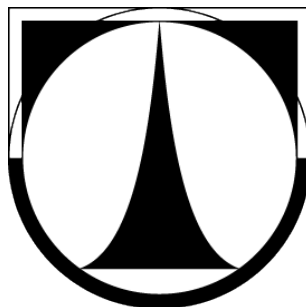


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



**TEXTILIE SE ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ
VŮČI ELEKTROMAGNETICKÉMU
SMOGU**

**TEXTILE STRUCTURES WITH
ENHANCED ELECTROMAGNETIC
SHIELDING ABILITY**

Disertační práce

Ing. Veronika Šafářová

2014

Název disertační práce: TEXTILIE SE ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ
VŮČI ELEKTROMAGNETICKÉMU SMOGU

Autor: Ing. Veronika Šafářová

Obor doktorského studia: Textilní technika

Forma studia: Prezenční

Školící pracoviště: Katedra textilních materiálů

Školitel: prof. Ing. Jiří Militký, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem disertační práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a navržených postupů.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Veronika Šafářová

V Liberci, duben 2014

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému školiteli prof. Ing. Jiřímu Militkému, CSc. za nápad na zpracování aktuálního a zajímavého tématu, za jeho odborné vedení, cenné připomínky a čas, který mi věnoval.

Ráda bych dále poděkovala Ing. Jiřímu Procházce, obchodnímu řediteli společnosti Sintex a.s., za spolupráci při vzniku poloprovozních vzorků vyvíjených textilních struktur.

Děkuji také všem pracovníkům a studentům doktorského studia nejen fakulty textilní, kteří mi byli nápomocni při vypracování této disertační práce.

Mé poděkování za technickou a finanční podporu patří i Fakultě textilní TUL a dále MPO ČR a MŠMT ČR, v rámci jejichž projektů SGS 4822, SGS 4839, SGS 4870, M06047 a FR-TI1/122 vznikly dílčí výsledky této práce.

Na závěr bych ráda poděkovala svému příteli, mým rodičům a všem blízkým za jejich podporu, povzbuzení a především za důvěru.

ANOTACE

V současné době je každý z nás vystaven expozici elektromagnetického záření jak doma, tak v zaměstnání a není pochyb o tom, že elektromagnetická pole mají biologické účinky na lidský organismus. Tato skutečnost vytváří podnět k potřebě vývoje textilií a oděvů s dostatečnou ochranou vůči tzv. elektrosmogu. Tato disertační práce se zabývá tvorbou plošných textilií a následně oděvů se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu při zachování základních vlastností kladených na textilie používané v textilním, popř. oděvním průmyslu. Hlavní pozornost je věnována návrhu a následnému průzkumu textilních struktur v linii „vlákno – příze – textilie“ především z hlediska elektrického chování, odolnosti vůči elektromagnetickému smogu a vybraným komfortním a užitným charakteristikám vyvinutých textilií. V práci jsou porovnány různé metody měření elektromagnetické stínící účinnosti textilií. Navrženo a otestováno je nové zařízení určené pro měření parametru stínící účinnosti plošných materiálů. Na závěr je prozkoumán také vztah mezi elektrickou vodivostí a elektromagnetickým stíněním. Výsledky práce ukazují, že navržené textilie a oděvy splňují požadavky kladené jak na dostatečnou úroveň odstínění elektromagnetického pole, tak na příznivé mechanické, termofyziologické a užitné vlastnosti.

Klíčová slova: efektivita elektromagnetického stínění, elektrické vlastnosti, hybridní textilie, kovová vlákna

ANNOTATION

Electromagnetic radiation surrounds us both at home and in work each day nowadays and there is no doubt that electromagnetic radiation may pose serious health effects on the human body. This fact creates an impulse for the necessity of development of fabrics and clothing with sufficient electromagnetic smog protection. This thesis examines the possibilities of creating fabrics and clothes with increased resistivity to electromagnetic smog while preserving basic characteristics of textile structures designated for clothing purposes. The main attention is paid to design and subsequent examination of textile structures „fiber – yarn – fabric“ especially in terms of electrical behavior, electromagnetic smog resistivity and chosen thermo-physiological comfort and utility characteristics of developed fabrics. Comparison of fabric electromagnetic shielding measurement performed by different instruments and approaches is performed. New apparatus designated for evaluation of electromagnetic shielding efficiency of planar materials is proposed and tested. A relationship between electrical conductivity and electromagnetic shielding is also examined. The results show that designed fabrics and clothes satisfy the requirements for both sufficient level of electromagnetic shielding and positive mechanical, thermophysiological and usable properties.

Key words: electromagnetic shielding efficiency, electric properties, hybrid fabrics, metal fibers

АННОТАЦИЯ

В настоящее время каждый из нас подвергается воздействию электромагнитного облучения дома, во многих случаях и на рабочем месте. Нет сомнений, что электромагнитное поле имеет патогенное влияние на человека. Этот факт послужил импульсом для данной работы. Диссертационная работа посвящена разработке текстильных полотен с повышенной стойкостью к электромагнитным излучениям и изделий из них. Внимание прежде всего уделяется разработке и исследованию текстильных структур «волокно – пряжа – текстильное полотно» с точки зрения их электрических свойств и стойкости к электромагнитному смогу. Кроме того исследуются избранные характеристики комфортности и потребительские свойства предложенных текстильных структур. В работе изучаются количество проводящей компоненты, её расположение, и другие параметры, влияющие на защитные свойства текстильных полотен от электромагнитных излучений. Проведено сравнение результатов измерений эффективности электромагнитного экранирования, которые были получены с использованием различных методов и измерительных приборов. Разработано и протестировано собственное устройство для измерения эффективности электромагнитного экранирования текстильных полотен, а также исследована зависимость между электропроводностью и экранированием электромагнитного излучения. Результаты работы показывают, что разработанные текстильные полотна и изделия из них соответствуют требованиям по защите от воздействия электромагнитного поля, в то же время обладают достаточными механическими, термофизиологическими и потребительскими свойствами.

Ключевые слова: эффективность электромагнитного экранирования, электрические свойства, гибридные текстильные полотна, металлические волокна

Obsah

1	Úvod	8
2	Předmět a cíle disertační práce	9
3	Přehled současného stavu problematiky	11
4	Teorie stínění elektromagnetického pole	13
4.1	Základní charakteristiky elektromagnetického záření	13
4.1.1	Veličiny popisující elektromagnetické pole	13
4.1.2	Rovinná elektromagnetická vlna	16
4.2	Elektromagnetické stínění	19
4.2.1	Základní charakteristiky	19
4.2.2	Mechanismus stínění	20
4.3	Elektromagnetická pole a zdravotní rizika	26
4.4	Metody přímého měření elektromagnetického stínění plošných materiálů	28
4.4.1	Metoda stíněné schránky	28
4.4.2	Metoda stíněného vlnovodu	29
4.4.3	Metoda koaxiálního přenosového vedení	30
4.4.4	Metoda stíněného prostoru	31
4.5	Specifické požadavky na textilie odolné vůči elektromagnetickému smogu	32
4.6	Predikce efektivity stínění	33
4.6.1	Korelace mezi elektrickou rezistivitou a elektromagnetickým stíněním	33
4.6.2	Vybrané numerické modely stanovení elektromagnetického stínění	33
5	Elektrické vlastnosti materiálů	37
5.1	Vlastnosti elektrotechnických materiálů	37
5.2	Textilie se zvýšenou elektrickou vodivostí	39
5.3	Metody hodnocení elektrických vlastností textilních útvarů	40
5.3.1	Elektrické vlastnosti délkových textilních útvarů	40
5.3.2	Eliminace kontaktních odporů při měření elektrického odporu délkových textilních útvarů - inovovaná metodika	43
5.3.3	Elektrické vlastnosti plošných textilních útvarů	45
5.4	Predikce elektrické vodivosti systému „vlákno–příze–textilie“	47
5.4.1	Elektrická vodivost kompozitních polymerních materiálů	47
5.4.2	Elektrická vodivost přízí	48
5.4.3	Elektrická vodivost plošných textilií	49

6	Experimentální část	52
6.1	Textilní délkové útvary	52
6.1.1	Popis vzorků	52
6.1.2	Studium elektrické vodivosti	54
6.1.3	Studium vybraných mechanických vlastností	63
6.1.4	Shrnutí	66
6.2	Plošné textilie odolné vůči průchodu elektromagnetického záření	68
6.2.1	Popis vzorků	68
6.2.2	Studium elektrické vodivosti	72
6.2.3	Studium účinnosti elektromagnetického stínění	77
6.2.4	Studium vlivu údržby na elektromagnetickou stínící účinnost	87
6.2.5	Studium vybraných charakteristik souvisejících s komfortem a opotřebením	96
6.2.6	Shrnutí	100
6.3	Experimentální ověření nového zařízení pro měření elektromagnetické stínící účinnosti textilních vzorků	103
6.3.1	Studované materiály	104
6.3.2	Hodnocení stínící účinnosti	104
6.3.3	Výsledky a diskuse	105
6.3.4	Shrnutí	107
6.4	Porovnání různých měřících metod používaných pro hodnocení stínící účinnosti	108
6.4.1	Studované materiály	109
6.4.2	Hodnocení SE pomocí různých měřících přístupů	109
6.4.3	Výsledky a diskuse	110
6.4.4	Shrnutí	112
6.5	Možnosti predikce elektromagnetického stínění	114
6.5.1	Korelace mezi elektrickou vodivostí a účinností elektromagnetického stínění	114
6.5.2	Numerické stanovení elektromagnetické stínící účinnosti	115
6.5.3	Shrnutí	117
6.6	Prototypy oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu	119
6.6.1	Hodnocení stínící účinnosti	120
6.6.2	Hodnocení subjektivního komfortu nošení	122
6.6.3	Shrnutí	123
7	Zhodnocení výsledků a nových poznatků	124
8	Použitá literatura	127
9	Práce autora se vztahem ke studované problematice	132
9.1	Publikace v odborných časopisech	132
9.2	Kapitola v odborné knize	132
9.3	Příspěvek ve sborníku mezinárodní konference	133
9.4	Příspěvek ve sborníku domácí konference	135
9.5	Užitný vzor	135
	Seznam obrázků	136
	Seznam tabulek	140
	Seznam použitých symbolů	142

1 Úvod

Současná doba charakterizovaná bouřlivým rozvojem elektroniky, zejména v oblasti mikroprocesorové a komunikační techniky, s sebou přináší současně s vítanými možnostmi použití těchto zařízení i negativní vlivy, a to především nevídaný nárůst umělých zdrojů elektromagnetického pole. V konečném důsledku je každý z nás vystaven expozici elektromagnetického pole jak doma, tak i v zaměstnání, a to stejnosměrným elektrickým a magnetickým polem, střídavým nízkofrekvenčním elektrickým a magnetickým polem a vysokofrekvenčním polem. Zdrojem elektromagnetického záření je výroba a přenos elektrické energie, používání domácích elektrických přístrojů, telekomunikace, rozhlasové a televizní vysílání apod. Elektromagnetickým rušením můžeme označit jakýkoli elektromagnetický jev, který může zhoršit provoz přístroje, zařízení nebo systému anebo nepříznivě ovlivnit živou či neživou hmotu. Negativní biologické účinky uměle vytvářených elektromagnetických polí jsou celosvětově označovány jako „elektrosmog“. Je nesporné, že tato pole mají účinek na člověka, jako ostatně na každé vodivé těleso. Zdravotní účinek těchto polí a záření na lidský organismus je mimo jiné závislý na typu záření, jeho frekvenci, intenzitě (ta klesá se vzdáleností od zdroje) a době působení, tak i na vnímavosti konkrétního člověka (obecně jsou k těmto veličinám vnímavější děti, starší a nemocné osoby, existují jedinci se zvýšenou citlivostí vůči elektromagnetickým polím).

Elektromagnetické stínění je jedním z nejdůležitějších odrušovacích prostředků elektromagnetické kompatibility. Materiály používané pro tvorbu elektromagnetického stínění jsou charakteristické zejména vysokou elektrickou vodivostí a vysokou permeabilitou, proto největší efektivity dosahují kryty založené na použití kovů. Jedním z rozhodujících parametrů pro zlepšení odolnosti vůči elektromagnetickému smogu, snížení tendence k hromadění elektrostatického náboje a konstrukci inteligentních textilií obsahující vodivé dráhy je elektrická vodivost. Elektricky vodivé textilie se často používají ve speciálních oděvních a technických aplikacích, kde je účelem nahradit klasické kovy resp. jiné materiály pomocí flexibilních (textilních) struktur.

Škodlivé účinky záření na pracovištích s vysokou intenzitou, či dlouhou dobou expozice (pracovníci rozvodu velmi vysokého napětí, montéři vedení, operátoři počítačů aj.) je možno omezit přímou ochranou pracovníka (osobními ochrannými pracovními prostředky), závěsy, zástěnami apod. Za tímto účelem je vhodné použití plošných textilií se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému záření, které splňují i požadavky kladené na textilie určené pro oděvní účely, popř. požadavky na zachování cirkulace vzduchu na pracovišti.

Z uvedeného je zřejmá zvýšená poptávka po vývoji nových oděvních a speciálních technických textilií s unikátními vlastnostmi požadovanými pro jejich aplikace popsané výše. Cílem této disertační práce je přispět k rozvoji současného stavu problematiky v oblasti konstrukce textilií odolných vůči elektromagnetickému smogu určených zejména pro oděvní účely.

2 Předmět a cíle disertační práce

Předmětem disertační práce je prostudování vybraných textilních struktur „vlákno – příze – textilie“ z hlediska především elektrického chování a odolnosti vůči elektrickému smogu. Cílem práce je vytvoření plošných textilií se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému záření při zachování základních vlastností kladených na textilie používané v textilním průmyslu, popř. v oděvnictví. Jako studovaný soubor vzorků byly zvoleny plošné textilie (tkané, pletené), tvořené tzv. hybridními přízemi obsahujícími kromě klasických polymerních textilních vláken také velmi jemná staplová vlákna kovová.

Vlastní práce je rozdělena do sedmi kapitol. Ve třetí kapitole je uveden stručný přehled prací zabývajících se danou problematikou. Čtvrtá kapitola pojednává o teorii stínění elektromagnetického pole vč. metodiky hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti a možnostech predikce této veličiny. Pátá kapitola se věnuje elektrickým vlastnostem materiálů, popisuje různé přístupy tvorby elektricky vodivých textilií, jejich hodnocení z hlediska elektrické vodivosti a možnosti predikce této veličiny. Následující kapitola se podrobně věnuje experimentálnímu vývoji a hodnocení struktur odolných vůči elektromagnetickému smogu. Tato experimentální část práce je rozdělena do několika celků.

První oblast experimentální části disertační práce je věnována studiu elektrické vodivosti a vybraných mechanických vlastností lineárních textilních útvarů – vláken, přízí. Pro hodnocení elektrických vlastností délkových textilních útvarů bylo vyvinuto zařízení, pomocí něhož bylo možno sledovat závislost elektrického odporu na upínací délce útvaru. Byla navržena metodika měření, která odstraňuje nevýhody současného stavu techniky a eliminuje problém kontaktních odporů při experimentálním hodnocení elektrického odporu délkových textilních útvarů. Byl studován vliv vodivé komponenty (vodivého vlákna) na elektrické vlastnosti lineárních útvarů a vyhodnocen byl perkolační práh vodivé složky.

Elektrickými vlastnostmi vytvořených plošných textilních útvarů, hodnocenými prostřednictvím měření normovaných parametrů povrchové a objemové rezistivity, se zabývá další oblast experimentální části práce. Bylo realizováno měření účinnosti elektromagnetického stínění charakterizující odolnost textilie vůči elektromagnetickému smogu. Experimentálně byl studován vliv obsahu vodivé komponenty na elektrické vlastnosti plošných textilních útvarů a vliv obsahu vodivé komponenty na odolnost textilie vůči elektromagnetickému smogu. Byly stanoveny perkolační prahy vodivého vlákna. Na základě výsledků z regresních modelů byl optimalizován obsah vodivé komponenty v plošné textilii pro získání postačující elektrické vodivosti, resp. postačující odolnosti vůči elektromagnetickému smogu pro konkrétní aplikace. Byly studovány také další vybrané vlastnosti (např. mechanické, užité, komfortní, odolnost v údržbě), u nichž byla předpokládána změna se zvýšením obsahu vodivé komponenty v textilii.

Třetí oblast experimentální části práce popisuje ověření vhodnosti použití v práci nově navrženého a zkonstruovaného zařízení pro hodnocení stínící účinnosti plošných materiálů.

V rámci čtvrté dílčí kapitoly praktické části práce byly experimentálně prostudovány různé přístupy a metodiky hodnocení textilií z hlediska účinnosti elektromagnetického stínění používané v současné době ve světě a bylo provedeno jejich porovnání.

Průzkum závislosti účinnosti elektromagnetického stínění na elektrické vodivosti textilií popisuje pátá oblast experimentální části práce, a to zejména kvůli možnosti stanovení odolnosti textilie vůči elektromagnetickému smogu přímo ze znalosti elektrických vlastností, které jsou snadno měřitelné. Ze získaných experimentálních dat byly vytvořeny regresní predikční modely. Byly ověřovány také publikované numerické modely určené k výpočtu efektivity stínění na základě znalosti elektrických vlastností kompozitních materiálů.

V rámci čtvrtého celku práce byly prostudovány různé přístupy a metodiky hodnocení textilií z hlediska účinnosti elektromagnetického stínění a bylo provedeno jejich porovnání.

Poslední podkapitola experimentální části práce je věnována přípravě prototypů oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu. V rámci této části práce je provedeno také shrnutí hodnocení připravených prototypů z hlediska jejich stínící účinnosti a komfortu nošení.

Závěrem je provedeno zhodnocení výsledků práce a doporučení pro další činnost v uvedené oblasti.

Dílčí cíle disertační práce je možné rozdělit do následujících okruhů:

- návrh, výroba a ověření zařízení pro měření elektrického odporu lineárních útvarů v závislosti na upínací délce,
- vytvoření metodiky měření povrchového odporu délkových textilních útvarů s eliminací kontaktních odporů,
- průzkum závislosti elektrického odporu na upínací délce různých textilních útvarů,
- příprava dostatečně vodivých přízí pro konstrukci textilií odolných vůči elektromagnetickému smogu a jejich hodnocení
- studium elektrické vodivosti a účinnosti elektromagnetického stínění plošných textilních útvarů vyrobených z připravených přízí v závislosti na různých faktorech, vč. konstrukce mechanistických modelů a predikčních rovnic,
- hodnocení navržených plošných textilií z hlediska dalších vlastností (např. mechanické, užité, komfortní, odolnost v údržbě),
- experimentální ověření vhodnosti použití nově navrženého přístupu měření elektromagnetického stínění,
- experimentální porovnání výsledků hodnocení stínící účinnosti provedené pomocí různých měřících metodik,
- průzkum a validace platnosti modelů predikujících odolnost textilie vůči pronikání elektromagnetického záření na základě znalosti elektrických vlastností textilní struktury,
- příprava prototypů oděvů se zvýšeným komfortem odolných vůči elektromagnetickému smogu.

3 Přehled současného stavu problematiky

Nejvhodnější materiály určené pro stínění elektromagnetického pole vykazují vysokou elektrickou vodivost a vysokou magnetickou permeabilitu, a proto největší efektivity dosahují kryty založené na použití kovů. Snahou moderního materiálového inženýrství je však kovy nahradit polymerními materiály, a to zejména kvůli jejich nízké hmotnosti, mechanickým vlastnostem a ceně.

Většina syntetických vláken používaných v textilním průmyslu jsou elektrické izolátory s měrným odporem (rezistivitou) řádově 10^{12} – 10^{14} $\Omega\cdot\text{m}$. To je nevyhovující pro potřeby zajištění odvodu statického náboje a pro elektromagnetické stínění v oblastech, kde je nutná eliminace elektromagnetického smogu. Např. rezistivita pro antistatické materiály se pohybuje v rozmezí 10^2 – 10^9 $\Omega\cdot\text{m}$ (odpovídá povrchové rezistivitě cca 10^5 – 10^{12} Ω); zatímco pro materiály, určené ke stínění elektromagnetického pole je nutná rezistivita nižší než 10 $\Omega\cdot\text{m}$ (odpovídá požadavku na povrchovou rezistivitu nižší než 10^4 Ω). Elektricky vodivé textilie mohou být vyrobeny použitím elektricky vodivého základního elementu – vlákna. Použitím vláken kovových, uhlíkových, polymerních plněných vodivými aditivami, bikomponentních či vláken z vodivých polymerů se zabývá celá řada prací [1–12]. Další možností výroby elektricky vodivých textilií je jejich pokovování a povrstvování vodivými polymery, či vodivými částicemi. Jak je uvedeno v práci COTTETA [13], pro tvorbu textilií se zvýšenou vodivostí, resp. odolností vůči elektromagnetickému smogu určených pro oděvní aplikace je nutno dbát určitých omezení. Tyto požadavky se týkají mechanických vlastností a s tím spojených vlastností strukturních, tepelných charakteristik, omaku atd.

Jak shrnuje ve své práci CLINGERMAN [14], elektrická vodivost vícesložkových materiálů je závislá především na objemové frakci vodivé komponenty. Při nízkém obsahu vodivé složky se vodivost kompozitu pohybuje velice blízko vodivosti čisté polymerní matrice. Po překročení určité hodnoty koncentrace (perkolační prahu) dochází náhle ke zvýšení vodivosti o několik řádů. Perkolační práh odpovídá koncentraci, kdy se již částice chovají podobně jako spojitá vodivá struktura. Kromě koncentrace částic mají podstatný vliv na elektrickou vodivost celého útvaru fyzikální vlastnosti obou složek, zahrnující strukturní vlastnosti, povrchové a elektrické vlastnosti vodivé komponenty. Numerické modely elektrické vodivosti vícesložkových materiálů lze rozdělit do čtyř hlavních skupin. Jsou to modely statistické (např. KIRKPATRICK [15], BUECHE [16]), termodynamické (MAMUNYA [17, 18]), geometrické (MALLIARIS [19]) a strukturně orientované modely (např. práce NIELSENA [20]).

Elektricky vodivé polymery přitahují v posledních 20 letech velkou pozornost díky tomu, že současně vynikají jak fyzikálními a chemickými vlastnostmi organických polymerů, tak elektrickými vlastnostmi kovů. Z tohoto důvodu jsou kovové materiály čteně nahrazovány elektricky vodivými polymery v řadě aplikací, zejména pak v elektrickém a elektronickém průmyslu [21, 22]. Jedním z nejpoužívanějších přístupů výroby elektricky vodivých textilií z obtížně zpracovatelných vodivých polymerů je tvora sub-

mikronově silných vrstev vodivých polymerů na existující textilní substrát. V současné době je možno nalézt velké množství odborných článků pojednávajících o úpravě textilií zejména vodivým polymerem polyanilinem a polypyrrolem [9, 23, 24]. Účinnost stínění takto upravených textilií se pohybuje v oblasti cca 20 db pro 1.5 GHz. Uhlíková vlákna představují další skupinu elektricky vodivých vláken potenciálně vhodných pro konstrukci stínících bariér díky příznivé elektrické vodivosti, chemické odolnosti a nízké hustotě. Jejich nevýhodou je však velmi vysoký modul pružnosti v porovnání s vlákny klasickými. Použití uhlíkových nanotubic či začlenění vodivého plniva (uhlíková čern) představuje další přístupy jak získat vodivou textilní strukturu [25, 26]. Pro dosažení perkolačního prahu je však třeba včlenit dostatečné množství vodivých částic (někdy až 40 obj. %), což způsobuje značné snížení mechanických vlastností. Je nutno připomenout, že textilie vytvořené výše zmíněnými přístupy jsou určeny spíše pro technické použití než pro oděvní účely, a to zejména díky nepříznivým mechanickým a užitým vlastnostem.

Velmi uspokojujících výsledků stínící účinnosti bylo dosaženo při začlenění kovových či pokovených vláken a přízí do plošných textilií. Použití stříbrem povrstvených vláken obchodního označení X-static pro přípravu elektromagneticky stínících textilií popisuje ve své práci např. OZEK A KOL. [27]. Keprová tkanina tvořená 100 % příze obsahující pouze vlákno X-static dosahuje při frekvenci 1.5 GHz stínící účinnosti cca 60 dB. Zjištěno také bylo, že zakrytí (které závisí na jemnosti příze a dostavě tkaniny) má významný vliv na výslednou stínící účinnost.

Práce autorů DURAN A KOL. [28] představuje využití jádrových přízí pro konstrukci vodivých textilií vhodných pro stínění elektromagnetického smogu. Jako jádro bylo použito stříbrné hedvábí tloušťky cca 40 μm , pro opředení byla použita bavlněná vlákna. Tkanina připravená z jádrových přízí dosahovala při frekvenci 1.5 GHz cca 30 dB. Bylo zjištěno, že stínící schopnost lze zlepšit použitím vyšší dostavy osnovy a útku. Obdobné jádrové příze využívají pro konstrukci elektromagneticky stínících textilií autoři ORTLEK A KOL. [29]. V tomto případě však jádro příze tvořeno nerezovým ocelovým drátem tloušťky 20 μm . Tkaniny a pleteniny vyrobené z přízí získaných skaním bavlněné příze a měděného drátu průměru 0.05 a 0.1 mm jsou představeny v práci [30], přičemž průměrná hodnota stínící účinnosti se pohybuje kolem 10 db pro frekvenci 1.5 GHz. Pozorována byla vyšší stínící účinnost vzorku při použití měděného drátu s nižším průměrem a více vrstev materiálu.

Stoprocentní odstínění elektromagnetického pole ve svém článku popisují autoři SHYR a SHIE [5]. Pro docílení vysoké stínící schopnosti tkanin využili příze jemnosti 500 tex tvořené 100 % nekonečných nerezových ocelových vláken průměru 12 μm . Průměry kovových vláken ($d = 0.08 - 0.15 \text{ mm}$) a jemnosti přízí použitých v předchozích studiích [31–33] jsou však příliš vysoké, aby byly textilie z nich vytvořené dostatečně flexibilní pro oděvní použití.

Účinnost elektromagnetického stínění souvisí zejména s tloušťkou materiálu (přepážky), její elektrickou vodivostí, permitivitou a permeabilitou, dále pak parametry zdroje a parametry obklopujícího prostředí jak je uvedeno v práci HEMMINGA [34]. Numerické modely stanovení účinnosti elektromagnetického stínění textilních materiálů lze rozdělit do dvou oblastí. Jedná se o modely založené buď na struktuře plošné textilie (analýza zeslabení účinnosti stínící přepážky způsobená otvory v oblasti vazných bodů, viz práce PERUMALRAJE [35]), nebo na elektrických vlastnostech plošné textilie, především objemové rezistivitě (viz práce např. [33, 36–38]).

4 Teorie stínění elektromagnetického pole

Jak již bylo zmíněné výše, elektrické pole nás obklopuje i prostupuje ve všech situacích ve velkém počtu forem. Přichází k nám z vesmíru a vytváříme je sami nejen anténami, ale také každým úsekem elektrického vedení, každým výbojem atd.

Použití elektrických a elektronických zařízení se v poslední době velmi rychle zvyšuje. Mnohá zařízení jako elektromotory, počítače, kalkulačky, prodejní terminály, tiskárny, modemy, elektrické psací stroje, číslicové obvody, přenosová vedení, domácí elektrické přístroje i mobilní telefony jsou schopna vyzařovat elektromagnetické vlny, jejichž důsledkem jsou problémy s elektromagnetickou interferencí.

Elektromagnetické stínění je jedním z nejdůležitějších odrušovacích prostředků umožňujících obecně jak zmenšení rušivého vyzařování na straně zdrojů rušivých signálů, tak i zvýšení elektromagnetické odolnosti na straně přijímačů rušivých signálů. Jako elektromagnetické rušení lze označit jakýkoli elektromagnetický jev, který může zhoršit provoz přístroje, zařízení nebo systému anebo nepříznivě ovlivnit živou či neživou hmotu.

Technické prostředky, kterými dosahujeme uvedených cílů, nazýváme stínícími kryty či stíněním. Nejvhodnější materiály určené pro elektromagnetické stínění mají vysokou vodivost a vysokou permeabilitu, a proto největší efektivnosti dosahují kryty založené na použití kovů. Stále více jsou však kovy (kromě armádních aplikací) nahrazovány polymerními materiály, a to zejména kvůli jejich flexibilitě, nízké hmotnosti a ceně [3].

4.1 Základní charakteristiky elektromagnetického záření

4.1.1 Veličiny popisující elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole působí na bodový náboj Q pohybující se relativní rychlostí v vzhledem k jisté pozorovací soustavě silou, kterou nazýváme Lorentzova

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad (4.1)$$

Vektory intenzity elektrického pole \vec{E} a magnetické indukce \vec{B} rozhodují o silových účincích na náboje a považujeme je za *základní vektory elektromagnetického pole*. Kromě vektorů \vec{E} a \vec{B} se běžně uplatňují také vektory elektrické indukce \vec{D} a intenzity magnetického pole \vec{H} , které jsou přímo vázány na budící volné náboje a proudy [39].

Maxwellovy rovnice jsou základními zákony makroskopické elektrodynamiky, které zformuloval James Clerk Maxwell v roce 1865. V integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v jisté oblasti, zatímco v diferenciálním tvaru v určitém bodě této oblasti [40].

Ampérův zákon

První Maxwellova rovnice vychází z Ampérova zákona o celkovém proudu. Říká, že součet celkového vodivého proudu I a proudu posuvného $d\Psi/dt$, které procházejí v kladném směru plochou ohraničenou uzavřenou křivkou l , je roven cirkulaci vektoru intenzity magnetického pole \vec{H} po této křivce. Ampérův zákon říká, že pohybem elektrického pole vzniká magnetické pole. Tento zákon může být v integrální formě vyjádřen jako [40]

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{d\Psi}{dt} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{S}, \quad (4.2)$$

kde \vec{H} je vektor intenzity magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$], \vec{D} je vektor elektrické indukce [$C \cdot m^{-2}$] a \vec{J} je vektor hustoty elektrického proudu [$A \cdot m^{-2}$].

Diferenciální tvar tohoto zákona je možno zapsat ve tvaru

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (4.3)$$

Faradayův indukční zákon

Druhá Maxwellova rovnice vyjadřuje Faradayův indukční zákon: záporně vzatá časová změna magnetického indukčního toku $d\Phi/dt$ plochou, která je ohraničena spojitou křivkou l , je rovna cirkulaci vektoru intenzity elektrického pole po této křivce [40]

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}, \quad (4.4)$$

kde \vec{E} je vektor intenzity elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$] a \vec{B} je vektor magnetické indukce [T].

Zákon ukazuje, že pohybem magnetického pole je indukováno elektrické pole. Tento zákon může být vyjádřen také v diferenciálním tvaru

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (4.5)$$

Za normálního počasí se při zemském povrchu trvale samovolně udržuje pole o velikosti asi 140 voltů na metr, avšak před bouřkou a při bouřce dochází k význačnému vzrůstu intenzity tohoto pole. Při elektrickém průrazu suchého vzduchu, který je následován elektrickým výbojem, je hodnota intenzity elektrického pole rovna asi 3 milionům voltů na metr. Tělo člověka se při chůzi po podlaze z dobře izolující umělé hmoty nabije tak, že mezi ním a zemí je napětí větší než deset tisíc voltů [41].

Oproti jednotce intenzity elektrického pole je jednotka intenzity magnetického pole velmi velká. Magnetické pole s indukcí větší než 1 T se vyskytuje pouze v některých speciálních aparaturách, a to např. v zařízeních používaných pro magnetické rezonanční zobrazování v lékařské diagnostice, nebo v zařízeních používaných na výrobu permanentních magnetů. Magnetická indukce geomagnetického pole Země je v naší zeměpisné šířce rovno přibližně 50 μT . Ve vzdálenosti rovné jednomu metru od osamělého dlouhého přímého vodiče, kterým protéká proud o velikosti jednoho ampéru naměříme elektrické pole s indukcí rovnou 0.2 μT [41].

Gaussův zákon elektrostatiky

Třetí Maxwellova rovnice představuje Gaussovu větu elektrostatiky: výtok vektoru elektrické indukce \vec{D} ven z uzavřené plochy \vec{S} je roven náboji Q v prostoru ohraničeném \vec{S} [40]

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho_q \cdot dV = Q, \quad (4.6)$$

kde ρ_q je objemová hustota volného náboje.

Aplikací divergenčního teorému na (4.6) získáme rovnici v diferenciálním tvaru

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_q. \quad (4.7)$$

Zákon spojitosti indukčního toku

Čtvrtou Maxwellovou rovnicí je zákon spojitosti siločár magnetické indukce: integrál vektoru magnetické indukce \vec{B} po uzavřené ploše \vec{S} je roven nule [40]

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0. \quad (4.8)$$

Aplikací divergenčního teorému na (4.8) získáme diferenciální tvar Gaussova zákona pro magnetické pole

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (4.9)$$

Vektory \vec{E} , \vec{H} , \vec{B} , \vec{D} a \vec{J} jsou vzájemně svázány materiálovými vztahy. V homogenním lineárním izotropním prostředí je [40]

- vektor elektrické indukce \vec{D} přímo úměrný vektoru elektrické intenzity \vec{E} , přičemž konstantou úměrnosti je permitivita prostředí ε

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (4.10)$$

- vektor magnetické indukce \vec{B} přímo úměrný vektoru magnetické intenzity \vec{H} , přičemž konstantou úměrnosti je permeabilita prostředí μ ,

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (4.11)$$

- vektor plošné hustoty vodivého proudu \vec{J} [A.m⁻²] přímo úměrný vektoru elektrické intenzity, přičemž konstantou úměrnosti je měrná vodivost σ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (4.12)$$

Permitivitu prostředí ε je možno rozepsat jako součin permitivity vakua ε_0 a relativní permitivity prostředí ε_r . Z fyzikálního hlediska permitivita prostředí popisuje schopnost prostředí polarizovat se. Čím větší je permitivita prostředí, tím více je v něm „zeslabována“ elektrická intenzita vnějšího pole. Permitivita vakua ε_0 je přibližně $8.85 \cdot 10^{-12}$ F.m⁻¹ [39].

Obdobně pro permeabilitu platí $\mu = \mu_0 \mu_r$. Permeabilita prostředí popisuje schopnost prostředí magnetizovat se. Dle velikosti magnetické permeability dělíme látky na feromagnetické ($\mu_r \gg 1$), paramagnetické ($\mu_r > 1$) a diamagnetické ($\mu_r < 1$). Čím větší je permeabilita prostředí, tím více je „zesilována“ magnetická indukce vnějšího pole. Permeabilita volného prostředí μ_0 je $4\pi \cdot 10^{-7}$ H.m⁻¹ [39].

Pro měrnou vodivost materiálu platí $\sigma = \sigma_0 \sigma_r$, přičemž měrná vodivost mědi σ_0 je $5.82 \cdot 10^7$ S.m⁻¹ [39].

4.1.2 Rovinná elektromagnetická vlna

Elektromagnetické záření je zvláštním případem elektromagnetického pole a je jednou z forem přenosu energie prostorem. Energie od Slunce, energie v pečící mikrovlnné troubě, rentgenové záření při lékařském vyšetření nebo vyzařované teplo krbu, to všechno jsou případy přenosu energie elektromagnetickým zářením.

V případě omezení se na pohyb elektromagnetické vlny ve volném prostoru mohou být Maxwellovy rovnice zapsány ve tvaru [42]

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon_0 + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (4.13)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 + \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (4.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0, \quad (4.15)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0. \quad (4.16)$$

V případě šíření rovinné elektromagnetické vlny, jenž může být považována za nejjednodušší typ šíření, jsou magnetické pole a elektrické pole na sebe kolmé a šíří se kolmo k rovině obsahující tyto dvě složky, viz obr. 4.1. Pro elektromagnetickou vlnu sinusového průběhu s úhlovou frekvencí ω ($\omega = 2\pi f$ [s⁻¹]) lze s využitím Maxwellových rovnic zapsat komponentu elektrického pole ve směru x jako

$$E_x = E_{x0} e^{jk_0 z}, \quad (4.17)$$

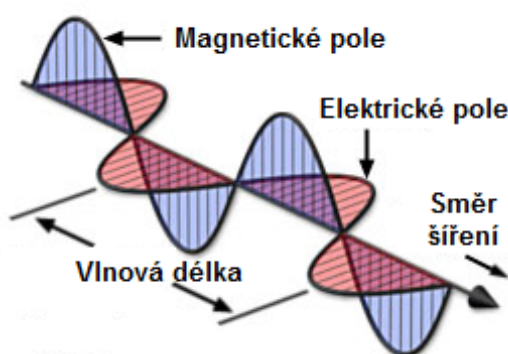
kde k_0 , vlnové číslo, je definováno jako

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (4.18)$$

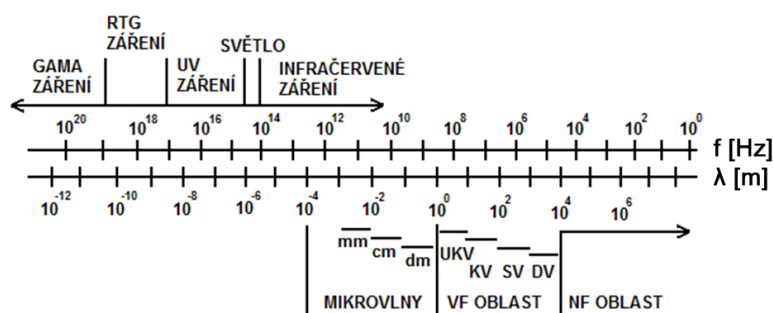
Ve volném prostoru se elektromagnetická vlna šíří rychlostí světla

$$c = f\lambda = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \cdot 10^8 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}, \quad (4.19)$$

kde f [Hz] je frekvence a λ [m] je vlnová délka elektromagnetické vlny, viz elektromagnetické spektrum na obr. 4.2.



Obrázek 4.1: Složky rovinné vlny.



Obrázek 4.2: Elektromagnetické spektrum.

Z pohledu kvantové fyziky je možno na elektromagnetické vlnění pohlédnout jako na proud fotonů, tvořících energetická kvanta. Podle Einsteinova vztahu je energie fotonu dána

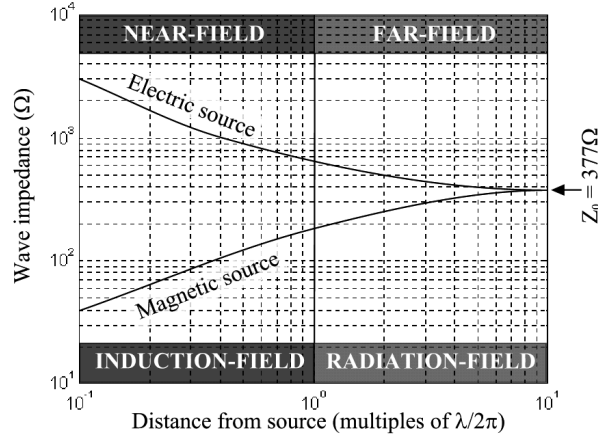
$$E_n = hf, \quad (4.20)$$

kde $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ J.s je Planckova konstanta. Podle energie fotonu lze rozdělit elektromagnetické záření na ionizující a neionizující.

Elektromagnetické záření může ionizovat atomy jen tehdy, je-li energie E_n jeho kvanta větší než energie, kterou je atomu nutno dodat k tomu, aby se od něho oddělil elektron. Hranice mezi ionizujícím a neionizujícím zářením je různá pro různé atomy a platí, že záření s vlnovou délkou větší než 319 nanometrů není schopné ionizovat žádný atom, a to bez ohledu na intenzitu [41]. Tento důležitý fakt, jakým je ztráta schopnosti ionizovat atomy, představuje významnou hranici pro působení elektromagnetického záření na hmotné objekty vč. živých organismů. Foton ionizujícího záření (např. rentgenové záření) způsobí v živé tkáni strukturální změny. Tyto změny se mohou v těle exponované osoby kumulovat a při dlouhodobé expozici se může nepříznivě projevit i velmi slabé ionizující záření. Kvantové vlastnosti se projevují i u neionizujícího záření. Pokud jeho kvanta mají energii blízkou hranici ionizace (ultrafialové záření), jsou tyto projevy blízké projevům ionizujícího záření. Počínaje infračerveným zářením však nevede pohlcování kvant záření ke změnám struktury molekul ani nevyvolává v těle chemické reakce, resp. tyto změny může vyvolat jedině prostřednictvím zahřátí látky na teplotu neslučitelnou se životem.

Vlastnosti elektromagnetického záření určují parametry zdroje, média obklopujícího zdroj a vzdálenost mezi zdrojem elektromagnetického záření a předmětem průzkumu (stíněním). V místě blízko zdroji elektromagnetického záření jsou charakteristiky záření určeny primárně vlastnostmi zdroje, zatímco ve vzdálené oblasti od zdroje záření závisí zejména na médiu, kterým se šíří. Z tohoto plynou dva regiony: oblast blízkého pole a oblast vzdáleného pole. Pokud je vzdálenost mezi zdrojem záření a stíněním větší než $\lambda/2\pi$ jedná se o stínění oblasti vzdáleného pole, viz obr. 4.3 [43].

Intenzita elektrického pole \vec{E} je kolmá k intenzitě pole magnetického \vec{H} . Jejich vzájemný poměr určuje veličina zvaná *vlnová impedance*. Je-li intenzita elektrického pole orientována ve směru x , pak obecně pro platí



Obrázek 4.3: Vlnová impedence [44].

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{j\omega\varepsilon + \sigma}}, \quad (4.21)$$

kde σ je elektrická vodivost, μ je magnetická permeabilita a ε je elektrická permitivita materiálu.

Pro vakuum nebo suchý vzduch platí

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{j\omega\varepsilon + \sigma}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{j\omega\varepsilon + 0}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi = 377 \Omega. \quad (4.22)$$

kde μ_0 a ε_0 je magnetická permeabilita, resp. elektrická permitivita vakua.

Vlnová impedence v oblasti vzdáleného pole odpovídá vlnové impedanci prostředí. V oblasti blízkého pole velké impedence charakterizují elektrické pole, zatímco malé impedence směřují k poli magnetickému. Se vzrůstající vodivostí prostředí vlnová impedence klesá. Pro ideální vodič je elektrická vodivost nekonečná a vlnová impedence nulová.

Velikost a směr šíření obou vektorů v elektromagnetické vlně se rychle mění a důsledkem těchto změn je přenos energie. Rychlost přenosu této energie, čili rychlost šíření elektromagnetické vlny, je rovna rychlosti světla a směr této rychlosti je kolmý na rovinu tvořenou vektory E_x a H_y .

Pro vyjádření velikosti energie, která je přenášena elektromagnetickou vlnou se používá veličina nazvaná hustota zářivého toku (výkonová hustota). Tuto veličinu označujeme symbolem Pd a její rozměr je $[W.m^{-2}]$ Hustota zářivého toku vyjadřuje výkon, který elektromagnetická vlna přenáší plochou rovnou jednomu čtverečnému metru kolmou na směr šíření vlny. Po hustotu zářivého toku platí vztah

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}. \quad (4.23)$$

Hustota zářivého toku slunečního záření při zemském povrchu dopadající kolmo na rovinou plochu je přibližně rovná $1300 W.m^{-2}$. Na povrchu dva metry vysoké směrové antény základové stanice obsluhující mobilní telefony je při běžně používaných vysokofrekvenčních výkonech a velikostech těchto antén hustota zářivého toku menší než $150 W.m^{-2}$ a s rostoucí vzdáleností od antény rychle klesá [41].

4.2 Elektromagnetické stínění

Elektromagnetické stínění je konstrukčním prostředkem k zeslabení pole rušivých signálů ve vymezené části prostoru. Technické prostředky (konstrukce), kterými je dosaženo uvedených cílů se nazývají stínícími kryty či stíněním. Stínící materiál působí jako bariéra vůči elektromagnetickému poli pracujícím na velmi širokém frekvenčním pásmu, které může dosahovat 50 Hz pro zdroje střídavého proudu, 100 kHz - 30 MHz pro dlouhovlnná, středněvlnná a krátkovlnná rozhlasová vysílání, 100 MHz - 500 MHz pro FM a televizní vysílače a několika GHz pro mobilní telefony a radarové zdroje [40].

Materiály používané pro tvorbu elektromagnetického stínění jsou charakteristické zejména vysokou elektrickou vodivostí a vysokou permeabilitou, proto největší efektivity dosahují kryty založené na použití kovů.

4.2.1 Základní charakteristiky

Působení elektromagnetického stínění jakožto lineárního systému lze charakterizovat tzv. koeficientem stínění K_S , který je definován poměrem intenzity elektrického pole E_t (nebo magnetického pole H_t) v určitém bodě stíněného prostoru k intenzitě E_i (H_i) pole dopadajícího na stínící přepážku (neboli pole v tomtéž bodě bez stínící stěny) [45]

$$K_S = \frac{E_t}{E_i} = \frac{H_t}{H_i}. \quad (4.24)$$

V praxi se většinou používá logaritmická míra tohoto koeficientu nazývaná efektivnost či účinnost stínění (útlum stínění). Stínící efektivitu (SE) pro elektrické pole [dB] je možno vyjádřit jako

$$SE_E = 20 \log \left| \frac{E_i}{E_t} \right|. \quad (4.25)$$

Pokud jde o magnetické pole, pro stínící efektivitu platí

$$SE_H = 20 \log \left| \frac{H_i}{H_t} \right|. \quad (4.26)$$

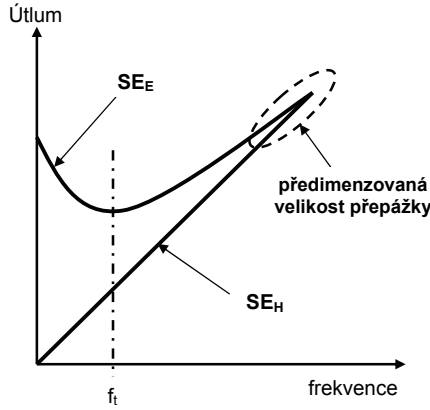
Stínící efektivitu lze také stanovit ze znalosti výkonové hustoty

$$SE_{Pd} = 10 \log \left| \frac{Pd_i}{Pd_t} \right|, \quad (4.27)$$

kde Pd_i je výkonová hustota pole [W.m^{-2}] dopadající na stínící přepážku a Pd_t je analogická hodnota propuštěná stíněním [45].

Typické chování SE_E a SE_H v závislosti na frekvenci je zobrazeno na obr. 4.4. Pod danou frekvencí f_t se elektrické a magnetické pole chová tak, jak bylo popsáno výše. Nad f_t stínící efektivita elektrického pole roste a v dostatečně vysokých frekvencích se připojuje ke stínící efektivitě magnetického pole. Tato charakteristická frekvence f_t odpovídá stavu, kdy se hloubka vniku δ stává menší než tloušťka stínící přepážky h [40]

$$\delta \leq h \text{ pak } f_t = \frac{1}{\pi \mu \sigma h^2}. \quad (4.28)$$



Obrázek 4.4: Vývoj elektrické a magnetické stínící účinnosti v závislosti na frekvenci [40].

Tento jev tedy nastává v případě, kdy jsou rozměry stínící přepážky příliš velké ve srovnání s vlnovou délkou elektromagnetického záření.

4.2.2 Mechanismus stínění

Velikost oslabení stíněním závisí na třech základních mechanismech, viz obr. 4.5

$$SE_{sheet} = RE_{sheet} + AB_{sheet} + M_{sheet}[\text{dB}]. \quad (4.29)$$

V dalším rozboru bude uvažována rovinná kovová stínící deska, na niž kolmo dopadá rovinná elektromagnetická vlna šířící se ve směru osy z . Kolmý dopad vlny na kovovou plochu představuje z hlediska stínění nejhorší případ. Je předpokládáno, že plocha stínící přepážky je neomezená, tzn. lze zanedbat efekty na jejích okrajích.

Prvním mechanismem je absorpční útlum (AB). Tento útlum vzniká pohlcením části energie elektromagnetické vlny při jejím průchodu stínící přepážkou o tloušťce h vlivem tepelných ztrát. Amplituda elektromagnetické vlny při průniku médiem klesá exponenciálně, viz obr. 4.6.

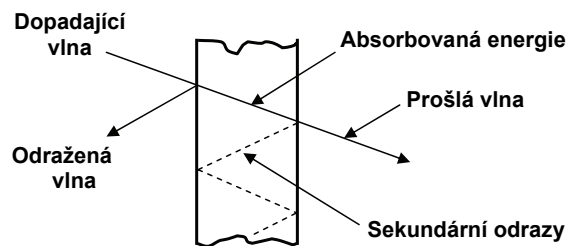
Pro intenzitu proniknuvší elektromagnetické vlny platí [44]

$$E_1 = E_0 e^{-\frac{h}{\delta}} \quad (4.30)$$

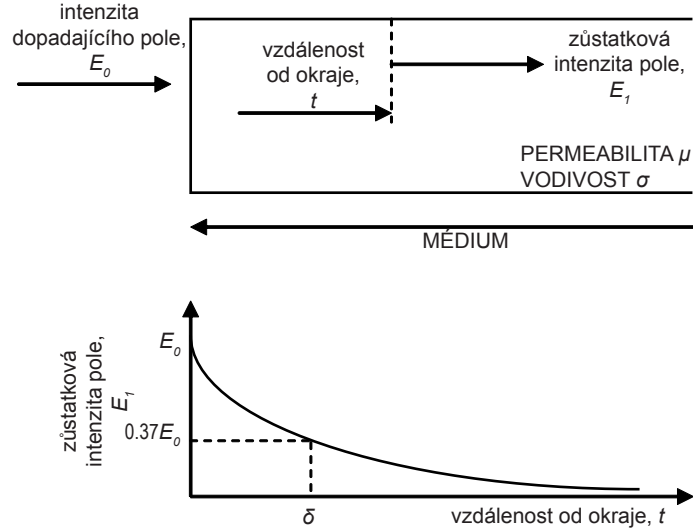
a

$$H_1 = H_0 e^{-\frac{h}{\delta}}, \quad (4.31)$$

kde E_1 (H_1) je intenzita elektromagnetické vlny ve vzdálenosti t uvnitř stínící přepážky jak je zobrazeno na obr. 4.6.



Obrázek 4.5: Základní mechanismy stínění.



Obrázek 4.6: Exponenciální útlum elektromagnetické vlny při průchodu materiálem [44].

Je zřejmé, že elektromagnetické pole se ve vodivých materiálech rychle utlumí. Vzdálenost, kdy je vlna utlumená na $1/e$ (e - Eulerovo číslo), resp. 37 % své původní hodnoty je nazývána jako hloubka vniku δ [m]

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\mu\sigma f}}. \quad (4.32)$$

Z uvedeného vyplývá, že pokud bude tloušťka stínící přepážky mnohem větší než hloubka vniku, amplituda vlny se výrazně redukuje při průchodu materiálem. Pro lepší představu jsou hloubky vniku elektromagnetické vlny δ do kovových materiálů při různých frekvencích uvedeny v tabulce 4.1.

Pro absorpční útlum platí [44]

$$AB = 20 \log \frac{E_0}{E_1} = 20 \log e^{\frac{h}{\delta}} = 8.6859 \frac{h}{\delta}. \quad (4.33)$$

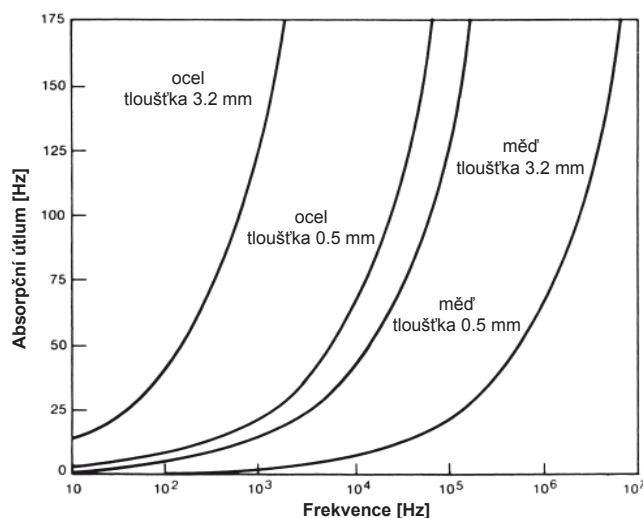
Dosazením rovnice (4.32) do rovnice (4.33) získáme obecný vztah pro absorpční útlum

$$AB = 0.0848h\sqrt{f\mu_r\sigma_r}, \quad (4.34)$$

kde h je tloušťka přepážky v [m].

Tabulka 4.1: Hloubka vniku různých materiálů [44].

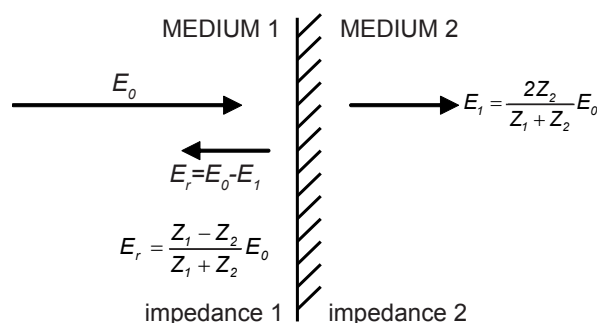
Frekvence	Měď [mm]	Hliník [mm]	Ocel [mm]
60 Hz	8.5090	10.8966	0.8636
1 kHz	2.0828	2.6670	0.2032
1 MHz	0.0762	0.0762	0.0076
100 MHz	0.0066	0.0076	0.0020
1 GHz	0.0020	0.0025	0.0010



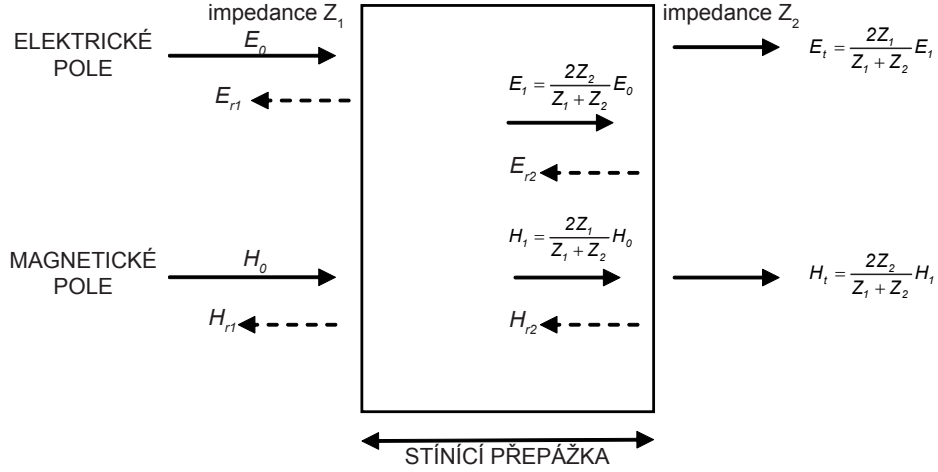
Obrázek 4.7: Útlum absorpcí roste se vzrůstající frekvencí a tloušťkou přepážky; ocel poskytuje vyšší absorpci elektromagnetického pole při stejné tloušťce [44].

Absorpční útlum versus frekvence pro dvě odlišné tloušťky stínící přepážky tvořené mědí a ocelí je zobrazen na obr. 4.7. Lze pozorovat, že tenká měděná přepážka (tloušťka 0.5 mm) poskytuje významný absorpční útlum (66 dB) při 1 MHz, ale téměř žádný útlum pro frekvence pod 1000 Hz. Výrazně lepších výsledků dosahuje ocelová stínící přepážka, což je způsobeno relativně vysokou relativní permeabilitou materiálu. Pro dosažení uspokojivého absorpčního útlumu pod 1000 Hz musí být i v případě oceli použito stínění s relativně vysokou tloušťkou.

Druhým ze základních mechanismů je útlum odrazem (RE). Útlum odrazem vzniká vlivem částečného odrazu energie vlny na impedančním rozhraní mezi např. vzduchem (dielektrikem) s impedancí Z_1 a např. pokovenou textilií s impedancí Z_2 a rovněž na „výstupním“ rozhraní mezi kovovou vrstvou a dielektrikem (vzduchem), viz obr. 4.8. Hlavní útlum odrazem elektrického pole vzniká na „vstupním“ rozhraní a pouze malá část energie vlny postoupí až k „výstupnímu“ rozhraní. Se vzrůstající vodivostí útlum odrazem roste, zatímco s klesající permeabilitou klesá. Útlum odrazem tedy nezávisí na tloušťce h stínící odrazivé přepážky, takže účinné elektrické stínění lze vytvořit i z tenké, avšak vysoce vodivé přepážky.



Obrázek 4.8: Dopadající vlna je částečně odražena na impedančním rozhraní a částečně propuštěna [44].



Obrázek 4.9: Částečný odraz a průnik nastává na obou rozhraních [44].

Pro intenzitu vlny proniknuvší z média s impedancí Z_1 do média s impedancí Z_2 platí [44]

$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0, \quad (4.35)$$

a

$$H_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} H_0, \quad (4.36)$$

kde E_0 (H_0) je intenzita vlny dopadající a E_1 (H_1) je intenzita vlny proniknuvší.

Jak bylo zmíněno výše, elektromagnetická vlna se při průniku stínící přepážkou střetává se dvěma rozhraními, viz obr. 4.9. Druhé rozhraní je tzv. výstupní mezi médiem s impedancí Z_2 a médiem s impedancí Z_1 . Pro prošlou vlnu E_1 (H_1) platí

$$E_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} E_1, \quad (4.37)$$

a

$$H_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} H_1. \quad (4.38)$$

Pokud má stínící přepážka dostatečnou tloušťku, celkovou intenzitu proniknuvší vlny je možno získat dosazením rovnic (4.35, 4.36) do rovnic (4.37, 4.38). Pro celkovou intenzitu vlny prošlé stínící přepážkou s dostatečnou tloušťkou tedy platí

$$E_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_0. \quad (4.39)$$

a

$$H_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} H_0. \quad (4.40)$$

Nahrazením vlnové impedance Z_1 za Z_0 a impedance stínící přepážky Z_2 za Z_M pro útlum odrazem RE platí (při zanedbání mnohonásobných odrazů) [44]

$$RE = 20 \log \frac{E_0}{E_1} = 20 \log \frac{(Z_1 + Z_2)^2}{4Z_1Z_2} = 20 \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0Z_M} \right|, \quad (4.41)$$

kde Z_M je charakteristická impedance vodivého prostředí stínící přepážky

$$Z_M = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}}. \quad (4.42)$$

Zobecněný vztah pro útlum odrazem může být zapsán jako [44]

$$RE = C + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r} \right) \left(\frac{1}{f^n + r^m} \right), \quad (4.43)$$

kde konstanty C , n a m pro rovinnou vlnu, elektrické a magnetické pole jsou specifikovány v tabulce 4.2, r je vzdálenost zdroje od stínící přepážky [m].

Tabulka 4.2: Konstanty rovnice (4.43) [44].

Typ pole	C	n	m
Elektrické pole	322	3	2
Rovinná vlna	168	1	0
Magnetické pole	14.6	-1	-2

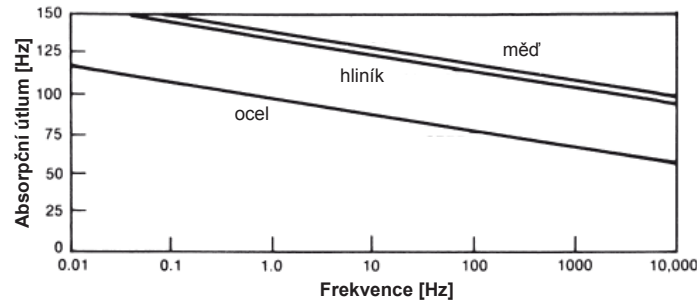
Na obrázku 4.10 je zobrazena závislost útlumu odrazem na frekvenci pro tři různé materiály: měď, hliník a ocel. Lze pozorovat, že ocel dosahuje vyššího absorpčního útlumu (viz obr. 4.7), zatímco měď dosahuje vyššího útlumu odrazem, což je způsobeno vyšší relativní vodivostí mědi.

Třetí mechanismus reprezentuje útlum vlivem mnohonásobného odrazu M . Tento typ útlumu vzniká díky opakovaným odrazům na vstupu a výstupu stínící přepážky [44]

$$M = 20 \log \left| 1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 e^{-\frac{2h}{\delta}} e^{-j\frac{2h}{\delta}} \right|. \quad (4.44)$$

Výskyt mnohonásobných odrazů vyžaduje přítomnost velkého specifického povrchu (např. porézní nebo pěnové materiály) nebo mezifázových ploch (např. kompozitní materiály obsahující plnivo s velkým specifickým povrchem) ve stínícím prvku. Je-li stínění vytvořeno z dobře vodivého materiálu ($Z_0 \gg Z_M$) a jeho tloušťka h je podstatně větší než hloubka vniku ($h \gg \delta$), pak je možno vliv mnohonásobných odrazů na celkovou účinnost stínění zanedbat.

Lze shrnout, že útlum odrazem RE je funkcí poměru σ/μ_r , zatímco absorpční útlum AB je funkcí součinu $\sigma.\mu_r$. Útlum odrazem RE tvoří dominantní složku stínícího účinku



Obrázek 4.10: Útlum odrazem rovinné elektromagnetické vlny je vyšší pro nižší frekvence a pro materiály s vyšší vodivostí [44].

Tabulka 4.3: Měrná elektrická vodivost materiálu vztažená k měrné elektrické vodivosti mědi (σ_r) a relativní magnetická permeabilita (μ_r) vybraných materiálů [42].

Materiál	σ_r	μ_r	$\sigma_r \mu_r$	σ_r / μ_r
Stříbro	1.05	1	1.05	1.05
Měď	1	1	1	1
Zlato	0.7	1	0.7	0.7
Hliník	0.61	1	0.61	0.61
Mosaz	0.26	1	0.26	0.26
Bronz	0.18	1	0.18	0.18
Nikl	0.2	100	20	$2 \cdot 10^{-3}$
Nerezová ocel	0.02	500	10	$4 \cdot 10^{-5}$

na nízkých kmitočtech pro magnetické i nemagnetické vodivé materiály. Na vysokých kmitočtech roste absorpční útlum a vysoce převyšuje klesající útlum odrazem. Tento vzrůst na vysokých kmitočtech je přitom výraznější u magnetických materiálů s $\mu_r \gg 1$. Na nízkých kmitočtech, kdy hloubka vniku $\delta \gg h$, příp. u velmi tenkých stínících přepážek ($h \ll \delta$) je hodnota útlumu mnohonásobnými odrazy záporná a snižuje celkovou účinnost stínění. S rostoucím kmitočtem se velikost $M \rightarrow 0$ dB a mnohonásobné odrazy v přepážce nemají vliv na účinnost stínění.

Tabulka 4.3 ukazuje vliv těchto faktorů u různých materiálů. Materiály jako stříbro, měď, zlato a hliník jsou vhodné pro útlum elektromagnetického pole odrazem díky jejich vysoké elektrické vodivosti, zatímco např. nikl a nerezová ocel jsou vhodnými absorbéry elektromagnetického záření díky své vysoké magnetické permeabilitě.

Z výše uvedeného je zřejmé, že nejvhodnější materiály určené pro stínění elektromagnetického pole vykazují vysokou elektrickou vodivost a vysokou magnetickou permeabilitu, a proto největší efektivitu dosahují kryty založené na použití kovů. Snahou je však kovy nahradit kompozitními materiály, a to zejména kvůli jejich požadované nízké hmotnosti, mechanickým vlastnostem (flexibilita) a ceně. Použití kompozitů obsahujících elektricky vodivé plnivo a nevodivou (polymerní) matici se osvědčilo, přičemž zakomponování plniva o nízké velikosti částic je vhodnější než použití plniva s částicemi většími, a to díky skin efektu. Obecně jsou upřednostňovány vodivé částice s velikostí 1 μm a nižší. Dále je vhodné využití plniva s vysokou vodivostí (pro zajištění útlumu elektromagnetického pole odrazem a absorpcí) a vysokým poměrem délky a tloušťky (tvorba vodivých řetězců). Plnivo ve vláknenné formě je preferováno před částicemi právě díky vysokému poměru délky a šířky vlákna. Z uvedeného vyplývá vhodnost použití kovových vláken dosahujících velmi nízkých průměrů (jednotky μm), přičemž nikl nebo nerezová ocel mají oproti mědi výhodu díky své odolnosti vůči korozi či oxidaci. Tenký oxidový povlak vznikající např. na povrchu měděných vláken má totiž jen velmi nízkou vodivost a působí tak ztrátu elektricky vodivých kontaktů mezi jednotkami plniva.

Efektivita stínění není závislá pouze na materiálu, ze kterého je stínící prvek vytvořen a jeho tloušťce, ale také na frekvenci zdroje elektromagnetického záření, vzdálenosti od zdroje záření ke stínicímu prvku a také na množství a tvaru různých nespojitostí přepážky. Jedná se zejména o mezery, trhliny, díry, atd. [35].

4.3 Elektromagnetická pole a zdravotní rizika

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) biologických systémů se zabývá celkovým elektromagnetickým pozadím našeho životního prostředí a přípustnými úrovněmi rušivých i užitečných elektromagnetických signálů (přírodních i umělých) s ohledem na jejich vlivy na živé organismy. I když jsou tyto vlivy pozorovány již delší dobu, nejsou výsledky dosavadních filologických a biofyzikálních výzkumů v této oblasti zcela jednoznačné.

Každý člověk reaguje na působení elektromagnetického pole jinak, protože jeho adaptační, kompenzační a regenerační možnosti a schopnosti jsou individuální. Proto je velmi obtížné analyzovat změny a na základě statistických výsledků dojít k obecně platným závěrům. To je jedním z důvodů, proč je ve světě zatím jen málo konkrétních klinických studií. Přitom za nežádoucí vlivy na člověka lze dnes považovat nejen přímé působení elektromagnetického pole na jeho pracovišti (obsluha vysílačů, radiolokátorů, výpočetních středisek, apod.), ale i dlouhodobé bezděčné působení elektronizovaného životního prostředí zejména doma, kde většina lidí tráví hodiny svého času ve „společnosti“ elektrických a elektronických zařízení (televizní a rozhlasové přijímače, kuchyňské spotřebiče, osobní počítače apod.) [46].

Problematikou EMC biologických systémů se zabývají některá výzkumná lékařská pracoviště s cílem posoudit odolnost lidského organismu vůči elektromagnetickým vlivům, mechanismy jejich působení apod. U vysokofrekvenčních a mikrovlnných polí jsou relativně nejvíce objasněny tzv. tepelné účinky, tzn. účinky, které se objeví jako výsledek ohřevu tkání vystavených vysokým úrovním polí. Nestačí-li se energie kvant elektromagnetického záření ionizovat nebo rozštěpit molekulu, změnit strukturu molekul v tkáni těla nebo vyvolat chemickou reakci, projeví se absorpce kvant záření jen zrychlením pohybu molekul tkáně a tedy růstem teploty. Tepelné působení je také jediným zjištěným vlivem při expozici člověka elektromagnetickému záření s vlnovou délkou větší než jeden milimetr a kratší než cca 30 metrů. Příslušné hodnoty prahových výkonových hodnot elektromagnetického pole na velmi vysokých kmitočtech, při jejichž překročení může nastat tepelné poškození organismu, jsou uvedeny v tabulce 4.4 [41].

U elektromagnetického záření a elektrických a magnetických polí s frekvencí nižší než 10 MHz se začíná uplatňovat další rizikový faktor, a to elektrický proud indukovaný vnějším elektromagnetickým polem v tkáni těla exponované osoby. Daleko nejcitlivější na elektrický proud jsou buňky nervové soustavy. Jejich stimulace elektrickým proudem může porušit srdeční rytmus nebo zhoršit funkci mozku, při velkých proudech i zcela paralyzovat činnost nervové soustavy. Stimulace nervové soustavy indukovaným elektrickým proudem je (stejně jako změna struktury molekuly nebo vyvolání fotochemické reakce při absorpci kvanta záření s dostatečně velkou energií) příkladem netepelného působení elektromagnetického pole na biologický objekt [41].

Účinky elektromagnetického pole na centrální nervový systém, srdečně-cévní, krve tvorný a imunitní systémy se přisuzují tzv. netepelným účinkům, tj. déle trvajícím expozicím polí s relativně nízkou výkonovou úrovní. Ani tyto, ani genetické či karcinogenní účinky však zatím nebyly jednoznačně prokázány. Všechny tyto skutečnosti v obtížnosti posuzování EMC biologických systémů jsou příčinou toho, že v příslušných hygienických normách ve světě existují až řádově velké rozdíly, např. v přípustných dávkách elektromagnetického záření.

Tabulka 4.4: Prahové výkonové hustoty tepelných účinků elektromagnetického pole.

Pásmo elektromagnetických vln [GHz]	Prahová výkonová hustota [mW.cm^{-1}]
0.2 - 3	40
3 - 30	10
30 - 300	7

V České republice jsou nejvyšší přípustné hodnoty pro expozici osob neionizujícímu záření stanoveny nařízením vlády 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, a to pro interval frekvencí od 0 Hz (statické pole) až $1.7 \cdot 10^{15}$ Hz (krátkovlnný kraj ultrafialového záření). Nařízení nahradilo vyhlášku č. 408/1990 Sb., která stanovila přípustné hodnoty pro elektromagnetické záření z intervalu frekvencí od 60 kHz do 1 THz, a směrnici ministerstva zdravotnictví ČR č. 61 o hygienických zásadách pro práci s lasery. Povinnosti provozovatelů zdrojů neionizujícího záření specifikuje § 35 zákona č. 258/2000 Sb. ze dne 14. července 2000 o ochraně veřejného zdraví a změně některých souvisejících zákonů.

Stanovením nejvyšších přípustných hodnot pro oblast nízkofrekvenčních elektrických a magnetických polí a pro optické záření nelaserových technologických zdrojů vyplnilo nařízení vlády mezery v dřívější legislativě. Pro frekvence od 0 Hz do 300 GHz převzalo nařízení vlády č. 480/2000 Sb. beze změn expoziční limity stanovené ve směrnici Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, zkratka ICNIRP), uveřejněné v roce 1998 v časopise Health Physics 74, str. 494 – 522. Světová zdravotnická organizace pokládá dodržení limitů ICNIRP za dostatečnou ochranu zdraví. Směrnice ICNIRP je výsledkem kritického zhodnocení více než deseti tisíc publikací a zpráv, majících vztah k působení elektromagnetického záření a elektrických a magnetických polí na biologické objekty. V tabulce 4.5 je uveden souhrn doporučených limitů ICNIRP.

Tabulka 4.5: Souhrn doporučených limitů ICNIRP. Uvedené hodnoty jsou expozice celého těla [46].

	Evropský průmyslový kmitočet		Frekvence základnových stanic mobilních telefonů		Frekvence mikrovlnných trub
	50 Hz	50 Hz	900 MHz	1.8 GHz	2.45 GHz
	elektrické pole	magnetické pole	výkonová hustota	výkonová hustota	výkonová hustota
	kV.m^{-1}	μT	W.m^{-2}	W.m^{-2}	W.m^{-2}
Limit expozice obyvatelstva	5	1000	4.5	9	10
Limit profesní expozice	10	500	22.5	45	50

4.4 Metody přímého měření elektromagnetického stínění plošných materiálů

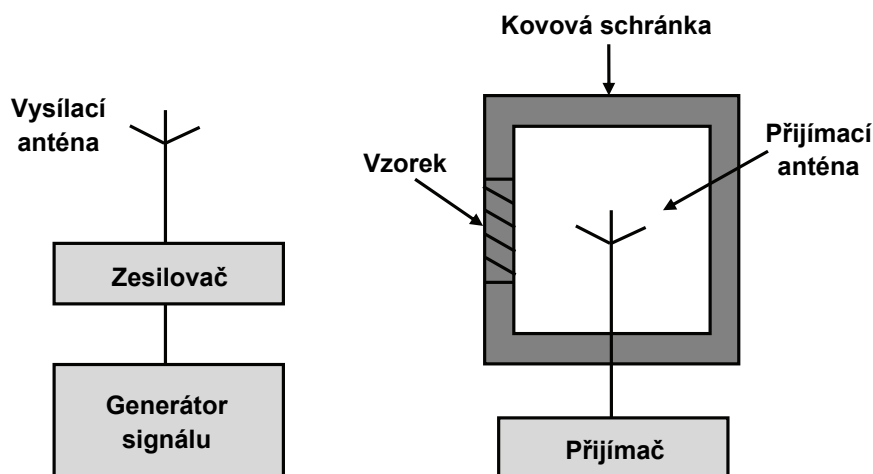
V praxi se nejčastěji setkáváme se dvěma principy měření stínicí účinnosti. Jedná se o měření pomocí stíněného prostoru (schránka, komora, vlnovod) a měření stínicí účinnosti na vedení [47]. Pro hodnocení elektromagnetické stínicí účinnosti plošných materiálů se běžně používají následující testovací metody:

- metoda stíněné schránky,
- metoda stíněného vlnovodu,
- metoda stíněného prostoru,
- metoda koaxiálního přenosového vedení.

Každá z uvedených metod popsaných v literatuře má specifické výhody i omezení. Bylo zjištěno, že v mnoha případech výsledky závisí zejména na individuálním geometrickém uskupení testovacího zařízení, včetně volby zdroje elektromagnetického záření a je velmi obtížné oddělit tyto vlivy a přiřadit nejistotu výsledkům [48].

4.4.1 Metoda stíněné schránky

Tato metoda se často používá pro porovnávací měření efektivnosti elektromagnetického stínění vzorků různých materiálů. Testovací zařízení sestává z kovové schránky, která má v jedné stěně otvor pro vzorek a uvnitř obsahuje přijímací anténu. Vysílací anténa je umístěna mimo kovovou schránku. Intenzita signálu přijímaného anténou je zaznamenávána jak bez vzorku, tak se vzorkem umístěným v otvoru. Schéma toho měření je zobrazeno na obr. 4.11 [49]. Nevýhodou této metody je obtížnost dosažení vhodného elektrického kontaktu mezi testovaným vzorkem a stíněnou schránkou. Další nevýhodou je omezený rozsah použitých frekvencí při měření [35].



Obrázek 4.11: Princip měření efektivnosti stínění pomocí metody stíněné schránky.

4.4.2 Metoda stíněného vlnovodu

Zařízení založené na metodě stíněného prostoru bylo vyvinuto v rámci disertační práce ve spolupráci s Fakultou mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci.

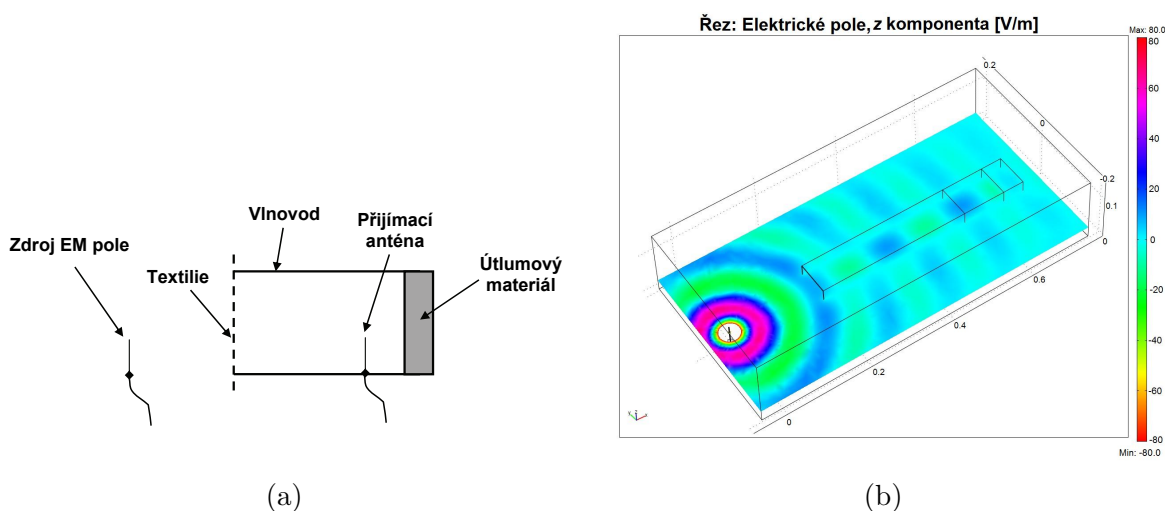
Stanovení elektromagnetického stínění se provádí na základě měření útlumu výkonové hustoty elektromagnetické vlny v materiálu pomocí jednoduchého zařízení. Zařízení se skládá z vlnovodu obdélníkového průřezu, uvnitř kterého je umístěna přijímací anténa, viz obr. 4.12(a). Na vstup vlnovodu se umísťuje měřený vzorek, výstup vlnovodu je opatřen vysoce absorpčním materiálem, který zabraňuje odrazu prošlé vlny zpět k přijímací anténě. Vně vlnovodu je umístěn zdroj elektromagnetického záření. Rozměry vlnovodu musí být dimenzovány dle požadované frekvence tak, aby vlna vstupující do vlnovodu měla specifické vlastnosti (postupná vlna s jedním maximem), tzn. pro úzké frekvenční pásmo je třeba použití vlnovodu odpovídajících rozměrů, viz obr. 4.12(b). Čím vyšší je studovaná frekvence, tím menší příčný rozměr vlnovodu je nezbytný. Efektivita stínění může být vypočtena na základě vztahu (4.27).

Harmonická vlna přenášená od vstupu ke konci vlnovodu je vybuzená vně vlnovodu. Při vyšších frekvencích může být elektromagnetické pole ve vlnovodu uspořádáno několika způsoby. Tyto způsoby uspořádání pole se nazývají módy nebo též vidy. Podle rozložení elektromagnetického pole zpravidla módy ve vlnovodech dělíme na transversálně elektrické (TE), tj. takové, které mají složky elektrického pole pouze ve směru průřezu vedení, ale nikoli ve směru šíření vlny, a vlny transversálně magnetické (TM), u kterých jsou transversální naopak složky magnetického pole [44].

Každý mód se může šířit až od určité (mezní) frekvence. Ta je dána vztahem

$$f_m = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad (4.45)$$

kde c je rychlost světla v dielektriku vyplňující vlnovod, a a b jsou délky stran průřezu vlnovodu, m a n jsou pořadová čísla vidu.



Obrázek 4.12: (a) Schéma zařízení pro měření efektivity elektromagnetického stínění, (b) simulace vstupujícího elektromagnetického pole dovnitř vlnovodu.

Vlnová délka vedené vlny je ve vlnovodu delší, než by byla vlnová délka rovinné vlny o stejné frekvenci ve volném prostoru. Pokud označíme délku vedené vlny indexem g a délku vlny ve volném prostoru indexem 0, platí

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}}, \quad (4.46)$$

kde f je frekvence vlny vedené vlnovodem a f_m je mezní frekvence vidu.

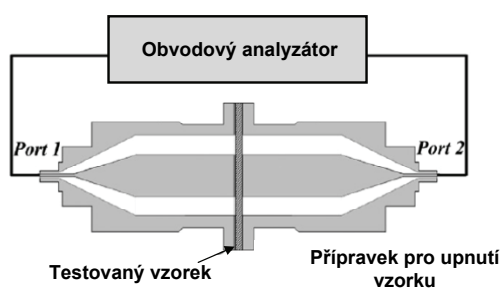
Například rozměry vlnovodu, ve kterém se bude budit vid TE_{10} , byly stanoveny: $a = 80$ mm a $b = 40$ mm. Tomu odpovídá mezní frekvence $f_{m10} = 1.875$ GHz při frekvenci zdroje 2.45 GHz. Při návrhu vlnovodu musí být mezní frekvence vždy menší než frekvence zdroje. Vlnová délka λ_g ve směru šíření pole je 200 mm.

Doposud byly vytvořeny dva vlnovody uzpůsobené pro měření dvou frekvencí. Jeden pro měření úzkého frekvenčního pásma 2.45 GHz, což odpovídá frekvenci mikrovlnných trub. Druhý vlnovod je dimenzován pro frekvenci 1.8 GHz. Na této frekvenci v současné době vysílá většina mobilních telefonů. Výhodou použití vlnovodné techniky je časově nenáročná příprava vzorků. Není nutno připravovat vzorky specifických rozměrů či tvarů, pro měření je dostačující takový materiál, pomocí něhož je možno překrýt vstup vlnovodu, tzn. není nutná potřeba vzorků velikých rozměrů.

4.4.3 Metoda koaxiálního přenosového vedení

Norma Americké společnosti pro testování materiálů (American Society for Testing Materials) ASTM D4935-99 byla publikována v roce 1999. Její platnost sice byla ukončena již v roce 2005, ale metoda, kterou popisuje je stále využívána v mnoha laboratořích pro měření stínící účinnosti plošných materiálů. Metoda je založena na podélně rozděleném koaxiálním vedení, viz obr. 4.13. Jako hlavní výhoda této metody je uváděno [49], že by měly být výsledky získané v různých laboratorních zařízeních porovnatelné. Touto technikou je možno rozlišit odraženou, pohlcenou a prošlou energii. Při využití této měřicí metody je použito 50 Ω koaxiální vedení o vnitřním průměru 33 mm a vnějším průměru 75 mm a speciální adaptér o průměru 133 mm vybavený přírubou, která spojuje obě části adaptéru. Test se provádí na vzorcích tvaru mezikružích a kruhu. Měřicí rozsah se u této metody pohybuje od 30 MHz do 1.5 GHz. S řádně upevněnou přírubou se chyba měření pro výše uvedený rozsah pohybuje okolo ± 5 dB [50], dynamický rozsah se při použití této metody je okolo 100 dB. Kontaktní odpor mezi vzorkem a držákem by měl být nižší než 0.2 Ω .cm.

Držák vzorků dle ASTM D4935-99 má komplexní tvar a je poměrně obtížné jej vyrobit. Na druhou stranu přípravek může sloužit také k hodnocení elektrické vodivosti elektricky tenkých vzorků, tj. vzorků jejichž tloušťka je mnohem menší než 1/100 vlnové délky elektromagnetického záření ve volném prostoru (2 mm pro 1.5 GHz, 3 mm pro 1 GHz). Tato metoda však skýtá také některé nevýhody. Bylo zjištěno, že výsledky naměřené v různých laboratořích se mohou lišit [51], což může být způsobeno rozdíly při výrobě testovacího držáku (nejasné konstrukční detaily v normě), povrchovou úpravou a rozměry konců držáku, kde jsou připevněny konektory. Mezi další nevýhody patří hmotnost měřicí hlavice, která se pohybuje kolem 18 kg a způsobuje značné nepohodlí při vkládání vzorků.



(a)



(b)

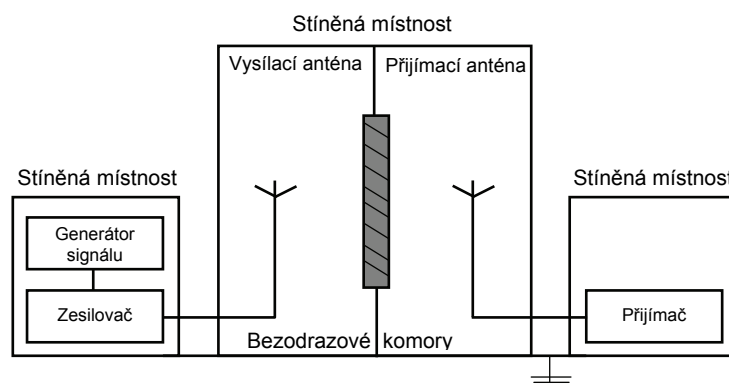
Obrázek 4.13: (a) Schéma měření efektivity stínění pomocí koaxiálního přerušného vedení, (b) fotografie měřící hlavice.

Za účelem snížení rozměrů testovaných vzorků (např. pro materiály na principu nanotrubic) byla vyvinuta modifikovaná zařízení [51, 52], jež překonávají nedostatky ASTM 4935 (rozšíření měřeného frekvenčního pásma, dynamického rozsahu a eliminace rezonančních maxim).

4.4.4 Metoda stíněného prostoru

Tato metoda je nejpropracovanější a byla vyvinuta proto, aby překonala omezení metody stíněné schránky. Metoda vychází se standardu vyvinutého pro armádu USA, MIL-STD-285. Základním princip je stejný jako u metody stíněné schránky kromě toho, že každá měřící komponenta měřícího systému (generátor signálu, vysílací anténa, přijímací anténa a záznamové zařízení) je izolovaná v oddělených prostorech za účelem vyloučení interferencí. Antény jsou navíc umístěny v prostorech bezodrazové komory, kterou představuje stíněný prostor obložený elektromagneticky absorpčním materiálem omezující vnitřní odrazy v komoře v širokém pásmu kmitočtů. Obkladové absorpční prvky mají nejčastěji tvar jehlanů či kuželů zhotovených z polystyrenu či polyuretanu s grafitovou impregnací. Velikost testovaného vzorku je zvětšena (2.5 m^2), viz obr. 4.14. Ve srovnání s metodou stíněné schránky je rozsah měřených frekvencí rozšířen (cca od 100 kHz do 10 GHz) a reprodukovatelnost dat je významně vylepšená [49]. Standard MIL-STD-285 (který pochází z roku 1956) byl později nahrazen normou IEEE-STD-299. Na podobném principu je založena také norma ČSN EN 50147-1 využívající bezodrazové komory a ČSN EN 61000-5-7. Metodika poslední zmíněné normy spočívá v provedení kalibračního měření (měření ve volném prostoru), v druhém kroku se umístí přijímací anténa do testovaného krytu a celé testovací měření se provede znovu. Stínicí účinnost se pak vypočte jako rozdíl výkonů přijímací antény při měření referenčním a měření stínicího krytu. Pro různá frekvenční pásma je nutno využít odlišných typů antén (např. kruhová, bikónická, dipólová, horn).

Předpokládá se [50], že výsledky testů provedených na stejných materiálech v různých laboratořích se mohou lišit dokonce v řádu několika dB. Tento jev je způsoben tím, že otvor ve stínicí zdi také ovlivňuje měření. Tento otvor sám o sobě tvoří typ antény s parametry záviselých na několika faktorech, zejména na rozměrech otvoru.



Obrázek 4.14: Princip měření efektivity stínění pomocí metody stíněného prostoru.

4.5 Specifické požadavky na textilie odolné vůči elektromagnetickému smogu

Dle dokumentu [53] mohou být tyto textilie rozděleny do dvou tříd:

- Třída I – profesionální použití: zdravotnické vybavení, materiály do karantény, bezpečnostní obleky pro výrobce elektroniky, elektronické nářadí nebo další nové aplikace,
- Třída II – obecné použití: běžné oděvy, oděvy do kanceláře, těhotenské oděvy, ochranné zástěry, výrobky související s přenosem dat, elektronické výrobky a další nové aplikace.

Testované vzorky by měly být předklimatizovány při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti $65 \pm 5\%$ po 24 hodin. Měření by mělo být provedeno ihned po klimatizování [53].

Materiály jsou klasifikovány dle efektivity elektromagnetického stínění do pěti kategorií, přičemž stupeň 5 je nejlepší a stupeň 1 nejhorší, viz tab. 4.6.

Tabulka 4.6: Klasifikace textilních materiálů dle účinnosti elektromagnetického stínění [53].

Třída I - Profesionální použití					
Stupeň	5	4	3	2	1
	Výborný	Velmi dobrý	Dobrý	Průměrný	Slabý
Rozsah efektivity elmag.stínění	$SE > 60\text{dB}$	$60\text{dB} \geq SE > 50\text{dB}$	$\geq SE > 40\text{dB}$	$40\text{dB} \geq SE > 30\text{dB}$	$30\text{dB} \geq SE > 20\text{dB}$
Třída II - Obecné použití					
Stupeň	5	4	3	2	1
	Výborný	Velmi dobrý	Dobrý	Průměrný	Slabý
Rozsah efektivity elmag.stínění	$SE > 30\text{dB}$	$30\text{dB} \geq SE > 20\text{dB}$	$20\text{dB} \geq SE > 10\text{dB}$	$10\text{dB} \geq SE > 7\text{dB}$	$7\text{dB} \geq SE > 5\text{dB}$

4.6 Predikce efektivity stínění

Přímé měření účinnosti elektromagnetického stínění vyžaduje využití speciálních zařízení, a jak bylo zjištěno, výsledky jsou navíc výrazně ovlivněny použitou měřicí metodou. Měření povrchové a objemové rezistivity je jednodušší. Z teorie je známo, že pro dostatečně vysoké frekvence postačuje měření pouze elektrické složky elektromagnetického pole. Z tohoto důvodu by mezi efektivitou elektromagnetického stínění a rezistivitou či vodivostí měl být funkční vztah.

4.6.1 Korelace mezi elektrickou rezistivitou a elektromagnetickým stíněním

Na základě rozsáhlých experimentů bylo zjištěno [84, 114], že parametry účinnosti elektromagnetického stínění a elektrická rezistivita vzorků jsou statisticky závislé. Zjištěno bylo dále, že je možno rozlišit dvě oblasti. Oblast pod perkolačním prahem, tzn. oblast nízkého obsahu vodivé komponenty a oblast nad perkolačním prahem (pro dostatečně vysoké obsahy vodivé komponenty). Jako nejvhodnější se jeví predikce na základě objemové rezistivity

$$SE = K_1 \ln(\rho_V) + K_2, \quad (4.47)$$

kde SE je efektivita elektromagnetického stínění, ρ_V je objemová rezistivita, K_1, K_2 jsou konstanty závislé na frekvenci a na struktuře vzorku (tkanina, pletenina) a na materiálovém složení. Tento vztah je platný zejména pro oblast nad perkolačním prahem.

4.6.2 Vybrané numerické modely stanovení elektromagnetického stínění

Využívané numerické modely stanovení účinnosti elektromagnetického stínění lze rozdělit do dvou oblastí. Jedná se o modely založené zejména na:

- elektrických vlastnostech plošné textilie, zejména objemové rezistivitě,
- struktuře plošné textilie (analýza zeslabení účinnosti stínící přepážky způsobené otvory mezi vaznými body).

Materiál, ze kterého je vyrobena elektromagnetická bariéra může být považován za dobře vodivý, pokud je jeho impedance Z_M mnohonásobně menší než impedance volného prostoru Z_0 . V případě dobře vodivého materiálu je možné ve výpočtu účinnosti stínění zanedbat útlum vlivem mnohonásobných odrazů M , jak bylo zmíněno výše.

Efektivita stínění (SE) vodivých materiálů může být vyjádřena pomocí těchto rovnic [36, 54]

$$SE_{sheet} = RE_{sheet} + AB_{sheet}, \quad (4.48)$$

$$RE_{sheet} = 50 + 10 \log \left(\frac{\sigma}{f} \right), \quad (4.49)$$

$$AB_{sheet} = 1.7h\sqrt{f\sigma}, \quad (4.50)$$

kde σ [S.cm⁻¹] je elektrická vodivost a f [MHz] je frekvence.

Obdobný tvar rovnice poskytuje model dle [37]

$$SE_{sheet} = 168 - 10 \log \left(\frac{\sigma_c f}{\sigma} \right) + 1.315 h \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_c}} f, \quad (4.51)$$

kde σ_C je vodivost mědi ($5.82 \cdot 10^5$ S.cm⁻¹) a h je tloušťka vzorku [cm].

Obdobné vztahy vycházející z rovnice (4.48) jsou studovány například v pracích [37, 44, 55, 56].

Účinnost stínění materiálů obsahujících uhlíkové plnivo závisí dle [57] na objemovém procentu vodivého materiálu P [%]

$$SE_{sheet} = 2.46P. \quad (4.52)$$

Efektivitu stínění v oblasti vzdáleného pole charakterizuje funkce závislá na σ , f a h [38]

$$SE_{sheet} = 10 \log \left(\frac{1}{4} \left[\left(\frac{\sigma}{2f\epsilon_0} \left[\cosh \left(\frac{2h}{\delta} \right) - \cos \left(\frac{2h}{\delta} \right) \right] + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 2 \sqrt{\frac{\sigma}{2f\epsilon_0}} \left[\sinh \left(\frac{2h}{\delta} \right) + \sin \left(\frac{2h}{\delta} \right) \right] + 2 \left[\cosh \left(\frac{2h}{\delta} \right) + \cos \left(\frac{2h}{\delta} \right) \right] \right] \right] \right) \quad (4.53)$$

Pro účinnost stínění kompozitních materiálů studovaných v [58] platí

$$SE_{sheet} = 20 \log \left(\frac{Z_0 \delta \sigma}{2\sqrt{2}} \right) + 8.68 \frac{h}{\delta}. \quad (4.54)$$

V případě elektricky tenkých stínění ($h \ll \delta$) se stává rovnice (4.54) nezávislá na frekvenci a omezuje se na

$$SE_{sheet} = 20 \log \left(1 + \frac{Z_0 t \sigma}{2} \right) \approx 42.5 - 20 \log(\rho_S). \quad (4.55)$$

V práci [33] je studována efektivita stínění laminátů složených z vrstev různé tloušťky a různé orientace. Pokud má vrstva jednotnou tloušťku a elektromagnetická vlna dopadá kolmo na přepážku, platí pro SE zjednodušený vztah

$$SE_{sheet} = 45.5 + 20 \log(N\sigma h), \quad (4.56)$$

kde N je počet vrstev kompozitu.

Výše uvedené vztahy platí za předpokladu výpočtu stínící účinnosti pro kompaktní těleso bez přítomnosti jakýchkoli nespojitostí. Ve skutečnosti je však této podmínky dosahováno velmi nesnadno. V textilní oblasti takového nespojitosti způsobuje již samotná otevřená struktura textlie, dále tento jev mohou způsobovat také například spoje, vč. švů.

Veškeré zmíněné otvory a póry značně snižují stínící efektivitu výrobku. Při vysokých frekvencích má dokonce stínící efektivita samotného materiálu nižší význam než zeslabení způsobené nespojitostmi (otvory, štěrbinami).

Tabulka 4.7: Maximální délka otvoru versus frekvence nutná pro dosažení $SE=20$ dB [44].

Frekvence [MHz]	Max. délka otvoru [cm]	Frekvence [MHz]	Max. délka otvoru [cm]
30	45.72	500	3.05
50	30.48	1000	1.52
100	15.24	3000	0.51
300	5.08	5000	0.25

Tabulka 4.8: Hodnoty redukce stínící efektivity v závislosti na počtu otvorů [44].

Počet otvorů	SE [dB]	Počet otvorů	SE [dB]
2	-3	20	-13
4	-6	30	-15
6	-8	40	-16
10	-10	100	-20

Velikost zeslabení stínící efektivity způsobené otvory závisí zejména na [44]

- maximálním lineárním rozměru (ne ploše) otvoru,
- množstvím otvorů,
- vlnové impedanci elektromagnetického pole,
- frekvenci pole.

Pro efektivitu elektromagnetického stínění jedné šterbiny s maximálním lineárním rozměrem rovným nebo menším než $1/2$ vlnové délky platí [44]

$$SE_{apt} = 20 \log \left(\frac{\lambda}{2l} \right) = 20 \log \left[\frac{150}{fl} \right], \quad (4.57)$$

kde λ je vlnová délka, l [m] je maximální lineární rozměr šterbiny a f je frekvence [MHz]. V tabulce 4.7 jsou uvedeny maximální rozměry šterbiny pro dosažení efektivity stínění 20 dB při různých frekvencích.

Pro lineární uspořádání šterbin platí, že redukce stínící efektivity je přímo úměrná odmocnině počtu šterbin n [44]

$$SE_{red} = -20 \log \sqrt{n} = -10 \log n. \quad (4.58)$$

V tabulce 4.8 jsou uvedeny hodnoty redukce stínící efektivity v závislosti na počtu otvorů.

Celkovou stínící účinnost šterbin lineárně uspořádaných je možno vyjádřit jako [44]

$$SE_{apt} = -20 \log \left[\frac{150}{fl\sqrt{n}} \right]. \quad (4.59)$$

S přihlédnutím k výše uvedeným faktorům uvádí [59] vztah pro výpočet účinnosti stínění samotných otvorů

$$SE_{apt} = 158 - 20 \log(lf) + 23.7 \log \left(1 + \ln \left(\frac{l}{s} \right) \right), \quad (4.60)$$

kde l je šířka otvoru [cm] a s je výška otvoru [cm].

Účinnost stínění způsobená samotnými nespojitostmi ve stínící přepážce může být dle [60] vyjádřena ve tvaru

$$SE_{apt} = 100 - 20 \log(Lf) + 20 \log \left[1 + \ln \left(\frac{L}{S} \right) \right] + 30 \frac{h}{L}, \quad (4.61)$$

kde L je maximální velikost otvoru [mm], S je minimální velikost otvoru a h je tloušťka plošné textilie [mm]. Rozměry otvorů nejsou totožné, proto se jako L uvažuje největší rozměr, zpravidla úhlopříčně, nikoliv nejdelší strana otvoru.

Z jiného úhlu nahlíží na problematiku otvorů v textilií práce [35, 61]. Pro výpočet stínění elektromagnetického záření otvorů je použit součet absorpčního útlumu, útlumu odrazem a útlumu mnohonásobnými odrazy, ke kterým jsou přičteny korekční členy. Rovnice má tedy tvar

$$SE_{apt} = AB_a + RE_a + M_a + K_1 + K_2 + K_3, \quad (4.62)$$

$$AB_a = 27.3 \left(\frac{h}{l} \right), \quad (4.63)$$

$$RE_a = 20 \log \left| \frac{(1 + 4T^2)}{4T} \right|, \quad (4.64)$$

$$M_a = 20 \log \left| 1 - \frac{(T - 1)^2}{(T + 1)^2} 10^{\frac{A_a}{10}} \right| \text{ pro } AB_a < 15 \text{ dB}, \quad (4.65)$$

kde h je tloušťka textilie [m], l je šířka otvoru [m], $T = j6.69 \cdot 10^{-3} fl$, f je frekvence [MHz], K_1 , K_2 a K_3 jsou korekční členy.

V této kapitole nazvané Teorie stínění elektromagnetického pole byly shrnuty základní charakteristiky elektromagnetického záření a základní charakteristiky a mechanismy elektromagnetického stínění. Jedna z podkapitol je věnována elektromagnetické kompatibilitě a biologickým účinkům tzv. elektrosmogu na lidský organismus včetně sumarizace současného stavu legislativy v oblasti ochrany zdraví před neionizujícími účinky záření.

Tato kapitola dále seznámila čtenáře s nejpoužívanějšími metodami přímého hodnocení stínící účinnosti plošných útvarů a postupy vhodnými pro predikci účinnosti elektromagnetického stínění na základě znalosti elektrické vodivosti a geometrických vlastností prvku. V kapitole následující bude pojednáno o elektrických vlastnostech materiálů.

5 Elektrické vlastnosti materiálů

Tato kapitola bude věnována elektrickým vlastnostem materiálů a jejich hodnocení, protože dostatečně vysoká elektrická vodivost je jedním z předpokladů při konstrukci stínících krytů.

5.1 Vlastnosti elektrotechnických materiálů

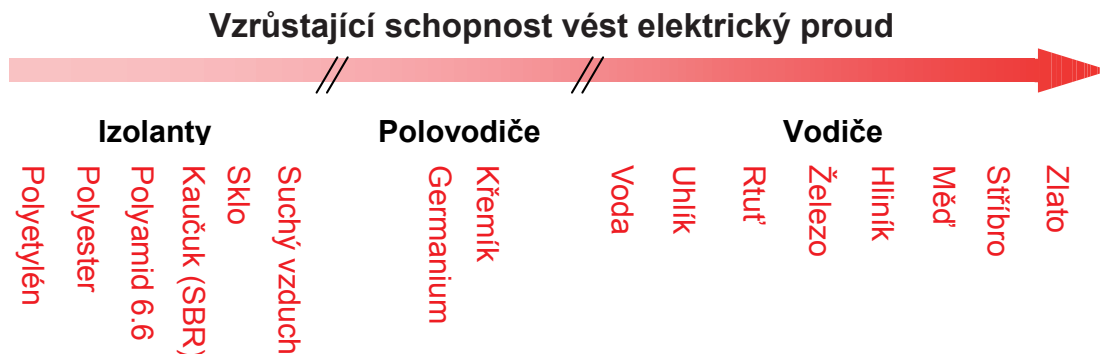
Pro látky umístěné v elektrickém poli mohou nastat tyto dva krajní jevy:

1. transport elektricky nabitých částic – vzniká elektrický proud doprovázený rozptylem energie; to je charakteristické pro vodiče;
2. vznik dipólů a indukovaných dipólů doprovázený akumulací energie; tento proces je vratný a typický pro izolátory (dielektrika) [62].

Materiály dělíme podle vodivosti na vodiče, polovodiče a izolanty, viz obr. 5.1. Mezi vodiče patří všechny kovy, které jsou základním materiálem pro výrobu kabelů, kontaktů, vinutí strojů, apod. Zpravidla je u nich požadováno minimálního elektrického odporu, maximální pevnosti v tahu, tvrdosti, odolnosti vůči otěru a korozi. Příčinou jejich vodivosti jsou volné elektrony.

Polovodiče mají oproti vodičům silnější vazbu mezi jádrem a elektrony. Ke vzniku volných elektronů potřebujeme dodat určité množství energie. Měrný odpor polovodičů se pohybuje kolem 10^{-6} až $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ [63].

Většina textilních vláken patří mezi elektrické izolátory. To je způsobeno skutečností, že všechny elektrony jsou vázány k atomovým jádřům nebo sdílené v kovalentních vazbách. Elektrická vodivost však není úplně nulová a závisí na obsahu různých přísad, resp. obsahu vlhkosti. Experimentálně bylo ověřeno, že pro hydrofilní polymery postačuje 1% obsah vlhkosti, aby jejich vodivost vzrostla o 8-10 řádů [64].

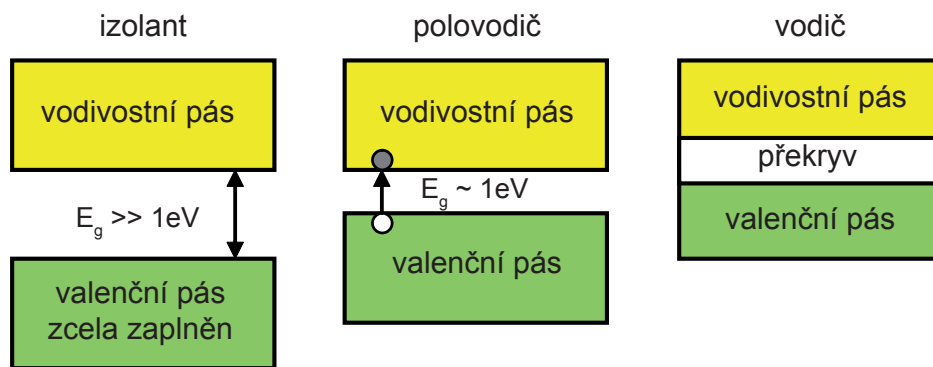


Obrázek 5.1: Rozdělení materiálů podle vodivosti.

Pásový model pevných látek

Elektrické vlastnosti materiálů (zejména polovodičů) popisujeme často pomocí pásového modelu. Energetické pásy znázorňují dovolené energetické stavy elektronů v látce. Podle Pauliho vylučovacího principu mohou být v jedné energetické hladině pouze dva elektrony. Dovolené pásy jsou od sebe odděleny zakázanými pásy, ve kterých se elektrony nemohou vyskytovat. Hladiny valenčních elektronů tvoří valenční pás. Vodivostní pás představuje oblast dovolených energií volných elektronů, které vyvolávají elektrický proud [63].

U vodičů je malá nebo téměř nulová šířka zakázaného pásu (obr. 5.2), vyskytují se v nich proto volné elektrony. U izolantů je šířka zakázaného pásu natolik velká (větší než 3 eV), že je pro elektrony prakticky nepřekročitelná. U polovodičů je možné při dostatečné energii tento pás překonat (1 eV – elektrovolt = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J je práce potřebná k přemístění jednoho elektronu mezi místy s rozdílem potenciálů 1 V) [63].



Obrázek 5.2: Pásový model látky.

Rezistance (elektrický odpor) vodiče R

Elektrický odpor vodiče R udává vztah mezi proudem I a napětím U mezi koncovými průřezy vodiče. Hlavní jednotkou elektrického proudu je ohm $[\Omega]$ definovaný Ohmovým zákonem [65]

$$R = \frac{U}{I}, \quad (5.1)$$

kde R je rezistance vodiče $[\Omega]$, I je elektrický proud $[A]$, U je elektrické napětí $[V]$. Pro elektrický odpor R drátu či vlákna (kruhového průřezu) délky L platí [62]

$$R = \frac{L \cdot \rho}{S} = \frac{4 \cdot L \cdot \rho}{\pi \cdot d^2}, \quad (5.2)$$

kde L je délka vodiče $[m]$, ρ je elektrická rezistivita (neboli měrný či specifický odpor) vodiče $[\Omega \cdot m]$, S je plocha průřezu vodiče $[m^2]$, d je jmenovitý průměr vodiče $[m]$.

Rezistivita (měrný odpor) vodiče ρ

Rezistivita vodiče neboli měrný či specifický odpor je veličina vyjadřující odpor vodiče jednotné délky a jednotného obsahu průřezu vůči průchodu elektrického proudu.

Měrný odpor (rezistivita) ρ je materiálová konstanta charakterizující elektrickou vodivost látky, pro kterou platí

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot R}{4 \cdot L}, \quad (5.3)$$

Vyjadřuje se ohmmetrech [$\Omega \cdot \text{m}$]. Rezistivita je převrácenou hodnotou konduktivity (měrné vodivosti).

Rezistivita mědi se pohybuje kolem $0.0171 \Omega \cdot \text{m}$ a díky tomu je měď jedním z nejlepších vodičů elektrického proudu (zaostává těsně za čistým stříbrem) [62, 64].

Konduktivita (měrná elektrická vodivost) σ

Elektrická vodivost vyjádřená v [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$], neboli měrná vodivost je mírou schopnosti materiálu vést elektrický proud. Je reciprokou (inverzní) hodnotou specifického odporu

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (5.4)$$

Součinitel elektrického odporu α

Odpor kovů se udává při teplotě 20°C a roste s teplotou přibližně lineárně (v rozsahu $0 - 100^\circ\text{C}$). Pro výpočet elektrického odporu kovového drátu teploty T_P je možno použít vztah

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T_P), \quad (5.5)$$

kde α_T teplotní součinitel odporu, R_0 je rezistance vodiče při teplotě T_{P0} a $\Delta T_P = T_P - T_{P0}$ je teplotní rozdíl.

Výše uvedený vztah platí pro kovy. Naproti tomu, odpor uhlíku, elektrolytů a polovodičů s rostoucí teplotou klesá [62, 64].

5.2 Textilie se zvýšenou elektrickou vodivostí

Většina syntetických vláken používaných v textiliích jsou elektrické izolátory s měrným odporem v řádu $10^{12} - 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$. To je mnohem více, než je požadovaná rezistivita pro potřeby elektromagnetického stínění. Např. požadovaná povrchová rezistivita pro antistatické materiály se pohybuje v rozmezí $10^2 - 10^9 \Omega \cdot \text{m}$; zatímco pro materiály, určené ke stínění elektromagnetického pole je rezistivita požadována nižší než $10 \Omega \cdot \text{m}$.

Některé textilní produkty se zvýšenou elektrickou vodivostí již byly vyvinuty např. v oblasti elektromagnetického stínění, odvodu elektrostatického náboje, atd. Při tvorbě vodivých textilií určených pro oděvní aplikace je ovšem nutno brát v úvahu určitá omezení. Jak je uvedeno v článku [13], oděvní textilie by měly být ohebné a pružné za účelem dosažení vysokého komfortu nošení. Textilie potřebují mít nízký ohybový a smykový odpor tak, aby byly snadno deformovatelné a splývavé. Čím je oděv těsnější, tím by měla být textilie pružnější. Z tohoto důvodu by používá vlákna měla být jemná ($< 1 \text{ tex}$) a textile by měla mít nízkou plošnou hmotnost ($< 150 \text{ g/m}^2$), obvykle ne více jak 300 g/m^2 . Tyto požadavky jsou neslučitelné s materiály a tvary, které jsou potřebné pro docílení elektrické vodivosti klasickými způsoby. Kovy, uhlík a vodivé polymery jsou poměrně tuhé a křehké materiály. Textilní inženýrství se stále soustřeďuje na vývoj

nových elektricky vodivých vláken a vytváří nové možnosti, jak vyrábět vodivé textilie z těchto materiálů. Mezi základní metody tvorby vodivých textilií patří:

- Použití vodivých vláken. Vodivá vlákna mohou být rozdělena do dvou základních skupin. Jedná se o přirozeně vodivá vlákna (např. kovová a uhlíková vlákna) a vlákna, která jsou speciálně zpracována pro docílení zvýšené elektrické vodivosti (vlákna povrstvená, vodivá bikomponentní či plněná vodivými částicemi). Tato vlákna mohou být použita přímo (netkané textilie), v ostatních případech výroby textilních struktur je nutno vyrobit příze, které mohou být buď ze 100 % vodivého vlákna, či směsové příze, obsahující i vlákna nevodivá.
- Povrstvování textilií. Nevodivé textilie je možno po základním výrobním procesu zpracovat za účelem zvýšení vodivosti nanesením vodivé vrstvy. Takovéto vodivé vrstvy mohou být tvořeny např. kovem nebo vodivými polymery. Po tomto kroku mají textilie zvýšenou povrchovou vodivost.
- Rozptylování elektricky vodivých částic do připravené textilie. Nevodivá textilie (zejména netkaná) je používána jako substrát, do něhož jsou aplikovány vodivé částice, jako jsou saze nebo kovové částice. Tímto způsobem je dosaženo požadovaného stupně vodivosti textilie.
- Potiskování textilií. Elektricky vodivá struktura je nanесena tiskařskými technikami (např. síťotiskem) na připravenou nevodivou textilii.
- prošívání textilií. Vodivá struktura je vyšita elektricky vodivými nitěmi na nevodivou textilii.

Každá ze zmíněných metod tvorby vodivých textilií skýtá určité výhody a nevýhody ve výsledných užitných vlastnostech výrobku. Konkrétní přístup pro výrobu vodivé struktury je nutno volit zejména s ohledem na konečný účel použití výrobku (limitace mechanických vlastností, komfortních vlastností, údržby, vzhledu, mechanické odolnosti či ceny).

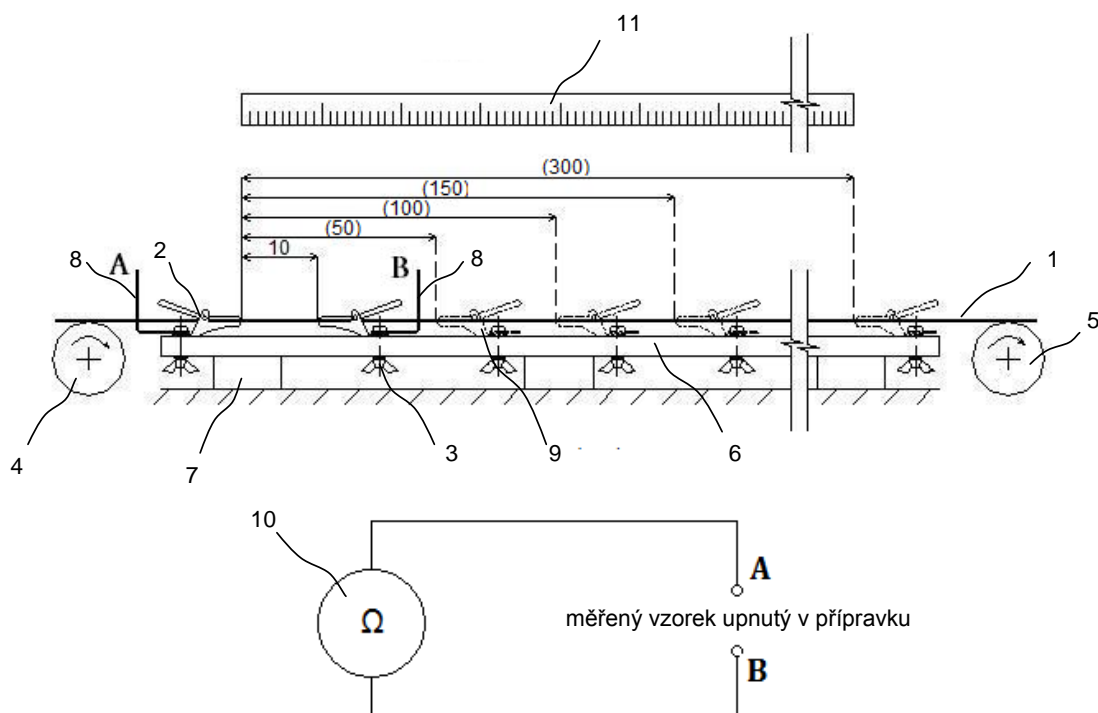
5.3 Metody hodnocení elektrických vlastností textilních útvarů

Elektrické vlastnosti délkových textilních útvarů (přízí) jsou obvykle hodnoceny dle délkového odporu a hmotnostní rezistivity. Plošné textilní jsou nejčastěji hodnoceny dle plošné a objemové rezistivity.

5.3.1 Elektrické vlastnosti délkových textilních útvarů

Znalost elektrických vlastností textilního materiálu např. ve formě vlákna, či příze prostřednictvím měření elektrického odporu je velmi důležitá, a to zejména pro využití za účelem predikce elektrické vodivosti celého systému „vlákno – příze – textilie“ a následného návrhu výrobku pro konkrétní použití.

Elektrické vlastnosti materiálu se obecně hodnotí dle měrného odporu ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]. Pro délkové textilní útvary (stejně tak jako u mechanických vlastností) je vhodnější založit definici na lineární hustotě materiálu neboli jemnosti. Hmotnostní rezistivita R_w ,



Obrázek 5.3: Schematický náčrt přípravku pro měření elektrického odporu délkových textilií: 1) měřený materiál, 2) elektrody ve tvaru svorek, do kterých je při měření upnut délkový textilní útvar, 3) upínání elektrod k nosné podložce skládající se ze šroubu, podložek a křídlkové matice, 4) přívádění měřeného materiálu, 5) navíjení měřeného materiálu, 6) nosná podložka tvořená elektricky nevodivým materiálem, 7) speciální podstavec zabráňující posuv přípravku po podložce, 8) vodiče spojující místo kontaktu elektrod měřeného materiálu s měřícím přístrojem, 9) další možné upnutí druhé elektrody - změna délky měřeného úseku, 10) ohmmetr, 11) měřítko umístěné na nosné podložce.

neboli hmotnostní specifický odpor je veličina vyjadřující elektrický odpor mezi konci vzorku 1 m dlouhého o hmotnosti 1 kg; hlavní jednotkou je $[\Omega \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$. Pro vyjádření této veličiny je nutná znalost velikosti elektrického odporu na definovaných úsecích délkového útvaru, kterou je možno zjistit experimentálně [66].

Pro měření elektrického odporu délkových textilních útvarů je v současné době používáno velké množství metod, mezi které patří např. metoda ampérmetru a voltmetru, či metoda Wheatstonova můstku. Uspořádání vzorku při měření je také významné. V současné době je používáno různých přístupů. Elektrický odpor může být měřen podél jednotlivých vláken, podél paralelně uspořádaných vláken, mezi konci příze, či mezi konci paralelně uspořádaných přízí. Nejčastěji je používáno k upnutí lineárních textilních útvarů kovových svorek, nepříliš četná je pak tvorba kontaktu pomocí vodivého nátěru či lepení [66].

Pro měření elektrického odporu délkových textilních útvarů v této práci byla zvolena dvouvodičová metoda, která je schematicky znázorněna na obr. 5.3. Měření elektrického odporu se provádí při těchto klimatických podmínkách (ČSN 80 0059): $T_P = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = (40 \pm 2)\%$ nebo $\varphi_2 = (65 \pm 2)\%$, testovací napětí 10 V pro hodnoty el. odporu do $10^5 \Omega$, 100 V pro vyšší resistance (ČSN EN 61340-5-2). Odběr vzorků délkových textilií se provádí podle ČSN EN 12751 (800070). Vzorky takto připravené se předsouš 2 h

při teplotě $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ a potom klimatizují minimálně 24 h v klimatických podmínkách uvedených výše. Při veškeré manipulaci se vzorky nesmí dojit k jejich znečištění, styku s pokožkou, působení chemikálií nebo jiných vnějších vlivů. Manipulace se provádí pomocí pinzety a rukavic.

Za účelem hodnocení elektrických vlastností délkových textilních útvarů bylo v rámci disertační práce vyvinuto zařízení, pomocí něhož bylo možno sledovat závislost elektrického odporu na upínací délce útvaru (obr. 5.3). Zařízení pro měření elektrického odporu délkových textilií se skládá z nosné elektricky nevodivé podložky a dvou elektrod ve tvaru svorek. Jedna z elektrod je pevná, druhá je posuvná na stupnici od 10 do 300 mm s krokem 50 mm. Měřený materiál se upne do elektrodového systému pomocí kovových svorek (materiál svorek volen tak, aby hodnota elektrického odporu přechodových kontaktů byla zanedbatelná vůči měřenému materiálu) a měří se elektrický odpor mezi elektrodami. Pomocí postupné změny upínací délky vzorku (10 – 300 mm) se proměří se závislost elektrického odporu na délce. Pro jednotlivé upínací délky délkové textilie je nutno proměřit alespoň 10 vzorků kvůli statistickému zpracování.

Délková rezistivita lineárních textilních útvarů R_L

Délková rezistivita lineárních útvarů je poměr rezistance mezi konci délkového útvaru a jeho délky. Platí

$$R_L = \frac{R}{L}, \quad (5.6)$$

kde R je elektrický odpor délkové textilie $[\Omega]$, L je délka vodiče $[\text{m}]$. Hlavní jednotka je $[\Omega \cdot \text{m}^{-1}]$.

Hmotnostní rezistivita R_w

Hmotnostní rezistivita, neboli hmotnostní specifický odpor je veličina vyjadřující elektrický odpor mezi konci vzorku 1 m dlouhého o hmotnosti 1 kg; hlavní jednotku je $[\Omega \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$. Vztah mezi hmotnostní rezistivitou a rezistivitou je následující [30]

$$R_w = \rho \rho_w, \quad (5.7)$$

kde ρ_w je měrná hmotnost materiálu $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$.

V praxi je výhodnější vyjádřit R_w v $[\Omega \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}]$. Při použití těchto jednotek je elektrický odpor R jakéhokoli vzorku vyjádřen následujícím vztahem [30]

$$R = R_w \frac{L}{N T} 10^5, \quad (5.8)$$

kde L je vzdálenost mezi konci vzorku $[\text{cm}]$, N je počet konců vlákna nebo příze a T je jemnost textilního délkového útvaru $[\text{tex}]$.

Kvůli širokému rozsahu hodnot elektrického odporu jsou výsledky častěji vyjadřovány pomocí logaritmu hmotnostní rezistivity.

5.3.2 Eliminace kontaktních odporů při měření elektrického odporu délkových textilních útvarů - inovovaná metodika

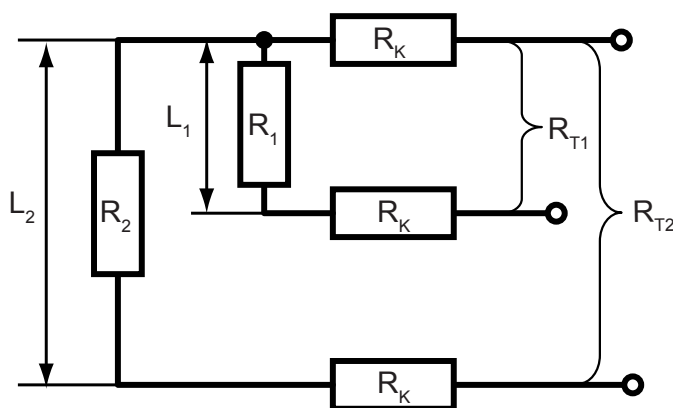
Jak již bylo zmíněno, v současnosti je nejčastěji používáno k hodnocení elektrického odporu délkových textilních útvarů upnutí vlákna, resp. příze do kovových svorek. Problém vytváří kontaktní odpor vznikající na styku mezi měřeným materiálem a kovovou svorkou.

Kontaktním odporem je označován poměr potenciálního rozdílu mezi dotýkajícími se plochami k intenzitě proudu kontaktem procházejícího. Tento odpor nemusí být vždy zanedbatelný, a to z těchto příčin:

1. plochy kontaktu nebývají vždy ideálně hladké, tudíž se nedotýkají ve všech bodech,
2. plochy kontaktu nebývají nikdy ideálně čisté, vždy jsou pokryty vrstvou kyslíku nebo jiných sloučenin, jejichž vodivost je nepatrná,
3. kontaktní odpor je silně závislý také na tlaku.

Výsledkem je vznik chyb, jimiž je snižována přesnost a reprodukovatelnost měření. Z výše uvedených důvodů je vhodné kontaktní odpor při měření vyloučit.

Za tímto účelem byla v rámci disertační práce vytvořena inovovaná metodika měření, kterou je dosaženo eliminace kontaktního odporu při hodnocení délkových textilních útvarů z hlediska jejich elektrické vodivosti, resp. při měření elektrického odporu pomocí dvouvodičové metody. Za účelem ochrany inovovaného technického řešení popsaného níže, byl dne 27.5.2013 zapsán do rejstříku Úřadu průmyslového vlastnictví v Praze užitečný vzor s názvem "Zařízení k měření elektrického odporu, zvláště textilních délkových útvarů"[116].



Obrázek 5.4: Schematický náčrtek odpovídajícího elektrického obvodu reprezentující měření elektrického odporu délkových textilních útvarů: L_1, L_2 [m] - délka zkoušeného vzorku, R_1 [Ω], R_2 [Ω] - elektrický odpor délkového textilního útvaru o upínací délce L_1 , resp. L_2 (neznámý), R_K - kontaktní odpor (neznámý), R_{T1}, R_{T2} - celkový elektrický odpor úseku zkoušeného vzorku o délce L_1 , resp. L_2 , vč. sumy kontaktních odporů.

Podstata inovované metodiky spočívá v měření elektrického odporu na dvou definovaných úsecích délkového textilního útvaru a následný výpočet elektrického odporu, který není zatížen chybou způsobenou kontaktním odporem.

Každý měřený úsek příze je zatížen chybou, kterou způsobují dva kontaktní odpory v místě upnutí vzorku. Princip technického řešení spočívá v úpravě standardní metodiky měření, pomocí níž je možno eliminovat kontaktní odpor způsobený uchycením délkového textilního útvaru elektrodami.

Jak je patrné z dalšího popisu, elektrický odpor je pomocí nové metodiky experimentálně měřen na úseku délkového textilního útvaru o délce L_1 . Tento odpor je označen R_{T1} a jedná se o celkový odpor úseku příze L_1 , vč. sumy kontaktních odporů. Následně je experimentálně změřen úsek příze o délce L_2 . Tato hodnota elektrického odporu je označena R_{T2} a jedná se o celkový odpor úseku příze L_2 vč. sumy kontaktních odporů, viz schéma na obr. 5.4.

Dle jednoduchého vztahu (viz níže) je možno určit elektrický odpor úseku příze L_1 , který není zatížen chybou, způsobenou kontaktními odpory. Za předpokladu lineárního vzrůstu elektrického odporu v závislosti na délce vzorku platí

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{L_2}{L_1}, \text{odtud} \quad (5.9)$$

$$R_2 = \frac{L_2}{L_1} R_1. \quad (5.10)$$

Dále platí, že

$$R_1 + 2R_K = R_{T1} \quad (5.11)$$

a

$$R_2 + 2R_K = R_{T2}. \quad (5.12)$$

Potom z rozdílů rovnic (5.12), (5.11) platí

$$R_2 - R_1 = R_{T2} - R_{T1}. \quad (5.13)$$

Po dosazení vztahu (5.10) do (5.13) platí

$$R_{T2} - R_{T1} = \frac{L_2}{L_1} R_1 - R_1 = \left(\frac{L_2}{L_1} - 1 \right) R_1. \quad (5.14)$$

Po úpravě vztahu (5.14) platí, že

$$R_1 = \frac{R_{T2} - R_{T1}}{\frac{L_2}{L_1} - 1}. \quad (5.15)$$

Jsou-li vzájemné vzdálenosti mezi všemi sousedícími elektrickými kontakty stejné (viz obr. 5.3), platí pro měřené délky L_1 a L_2 vzorků

$$L_2 = 2 L_1. \quad (5.16)$$

Po dosazení (5.16) do vztahu (5.15) platí pro velikost odporu R_1 vlastního zkoušeného vzorku bez kontaktních odporů R_K

$$R_1 = R_{T2} - R_{T1}. \quad (5.17)$$

Druhá část výpočtu pro zjištění skutečného elektrického odporu vlastního textilního materiálu s vyloučením vlivu neznámých kontaktních odporů v přechodu mezi elektrickými kontakty a zkoušeným vzorkem platí pro materiály charakterizované nelineárním vzrůstem elektrického odporu (viz experimentální část práce) se vzrůstající měřenou délkou vzorku. Výše uvedený vztah (5.10) platí potom v upravené podobě

$$R_2 = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{n+1} R_1, \quad (5.18)$$

kde n je faktor spojený s útlumem elektrické vodivosti (v případě ideálního vodiče je elektrický odpor lineární funkcí délky příze, je $n=0$). V případě $n=1$ je tedy elektrický odpor kvadratickou funkcí délky příze.

Pro elektrický odpor hybridního délkového útvaru (vykazující nelineární závislost elektrického odporu na upínací délce) o měřené délce L_1 , který již není zatížen chybou kontaktních odporů R_K , platí pro případ, kdy $L_2=2.L_1$, analogicky podle vztahů (5.15) a (5.17)

$$R_1 = \frac{R_{T2} - R_{T1}}{2^{n+1} - 1}. \quad (5.19)$$

Pro hodnocení elektrického odporu, resp. elektrické vodivosti u materiálů, jejichž odpor je nelineárně závislý na délce tohoto materiálu, je ovšem nutné znát předem faktor n spojený s útlumem elektrické vodivosti, viz experimentální část práce.

5.3.3 Elektrické vlastnosti plošných textilních útvarů

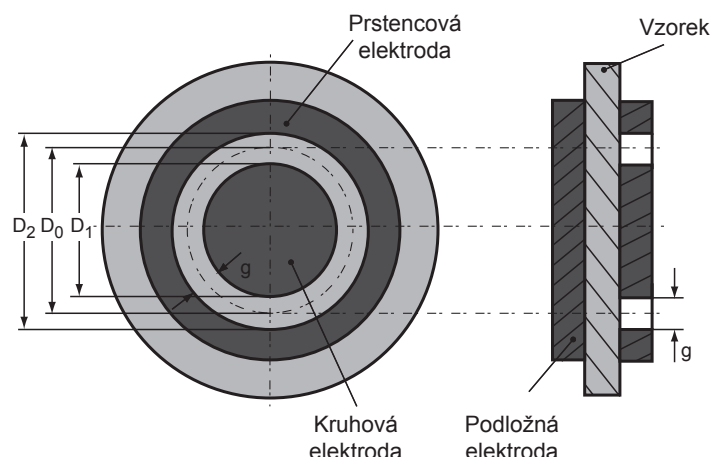
Měření povrchového a vnitřního odporu bylo provedeno dle normy ČSN 34 1382. Vzorky musí být předsoušeny 2 až 3 h při teplotě 60 a 65 °C a pak kondicionovány při teplotě $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu 40 % nebo 65 %. Pokud je nutno vzorky vyžehlit či vyprat, děje se tak před přípravou vzorku ke zkoušce.

Povrchový odpor plošných textilií R_S

Pro měření povrchového odporu textilních materiálů a folií se používá koncentrická elektroda odpovídající normě ČSN EN 1149-1, EN 100015, ČSN EN 61340-5-1, viz obr. 5.5.

Podložná elektroda je po jedné straně potažena izolační vrstvou o tloušťce 1 mm a odporu větším než $10^{13} \Omega$. Druhou část tvoří izolační válec s vybráním pro uložení podložné elektrody. Přítlačná koncentrická elektroda se skládá z vnější prstencové elektrody a vnitřní kruhové elektrody, které jsou nalepeny na izolační desce. Na druhé straně izolační desky je nalepena kovová stínící deska.

Po přípravě se vzorek umístí na izolační vrstvu podložné elektrody, která je položena ve válci izolační vrstvou nahoru. Na vzorek se položí koncentrické elektrody, na které se připojí měřicí přístroj podle obr. 5.5. Stínící deska musí zajišťovat tlak nejméně 2 kPa.



Obrázek 5.5: Přípravek pro měření povrchového a vnitřního odporu plošných textilních útvarů sestávající z koncentrických elektrod (prstencová a kruhová) a podložné elektrody. Platí: $(D_0 - D_1)/2 = g$, $D_0 = D_1 + g$, $D_1 = 50.4$ mm, $D_2 = 69$ mm.

Povrchová rezistivita plošných textilií ρ_S

Pro měření povrchové rezistivity textilie je nutné znát hodnotu středního obvodu elektrod a vzdálenost elektrod. Tyto hodnoty je možno zadat při měření přímo do měřicího přístroje, poté je možno odečítat hodnoty povrchové rezistivity z přístroje bez následného přepočítávání naměřených dat. Pokud nelze zadat tato data do měřicího přístroje, je nutno naměřený povrchový odpor přepočítat podle vztahu

$$\rho_S = R_S \cdot \frac{o}{g}, \quad (5.20)$$

kde ρ_S je povrchová rezistivita [Ω], R_S je povrchový odpor [Ω], g je vzdálenost mezi elektrodami [m], o je efektivní obvod elektrody, $o = \pi D_0$, viz obr. 5.5.

Vnitřní odpor plošných textilií R_V

Měření vnitřního odporu plošných vzorků textilu se provádí podle obr. 5.5. Kruhová podložná elektroda se položí na válec izolační vrstvou dospod. Vzorek se položí na kovovou plochu a zatíží koncentrickými elektrodami.

Objemová rezistivita plošných textilií ρ_V

Pro měření objemové rezistivity textilie je nutné znát hodnotu její tloušťky (ČSN EN 150 5084). Dále je nutno znát plochu elektrod. Tyto hodnoty je možno zadat při měření objemové rezistivity do měřicího přístroje, poté je možno odečítat hodnoty objemové rezistivity z přístroje bez následného přepočítávání naměřených dat. Obdobně jako u povrchové rezistivity, pokud není možné zadat tloušťku textilie a plochu elektrod do měřicího přístroje, přepočet naměřeného objemového odporu na objemovou rezistivitu se řídí vztahem

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h}, \quad (5.21)$$

kde ρ_V je objemová rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$], R_V je vnitřní odpor [Ω], h je tloušťka textilie [cm], S je plocha elektrod [cm^2].

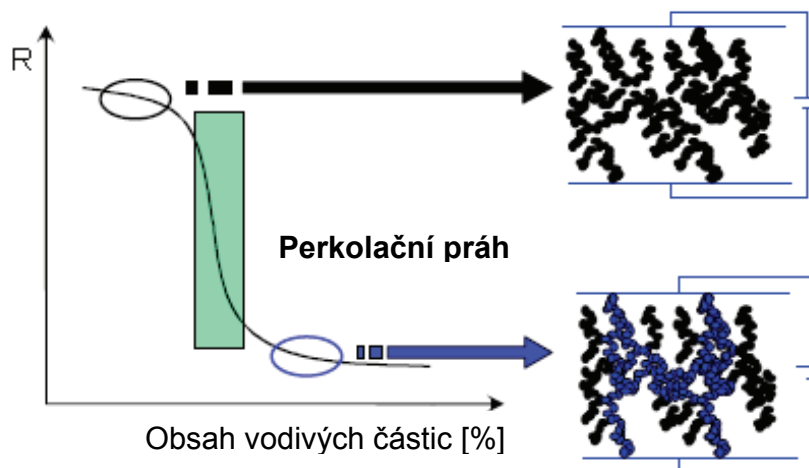
5.4 Predikce elektrické vodivosti systému „vlákno–příze–textilie“

Tato podkapitola shrnuje základní numerické modely elektrické vodivosti vícesložkových kompozitních materiálů, přízí a plošných textilií.

5.4.1 Elektrická vodivost kompozitních polymerních materiálů

Elektrická vodivost polymerních kompozitů je obecně charakterizována pomocí závislosti elektrické vodivosti na koncentraci vodivé komponenty. Při nízkých koncentracích vodivých částic se vodivost příliš nezvyšuje – blíží se vodivosti čistého polymeru. V oblasti určité kritické koncentrace (zvané perkolační práh) vodivost vzrůstá o několik řádů při velmi nízkém zvýšení koncentrace vodivé komponenty. Další zvýšení vodivých částic již nemá významný vliv na vodivost [14].

Perkolační práh může být také definován jako nejnižší koncentrace vodivých částic, při které jsou částice v dostatečné blízkosti a tvoří vodivé řetězce. Jak je uvedeno v [14], elektrická vodivost je zajištěna buď přímým kontaktem mezi vodivými částicemi, nebo pomocí tunelového efektu bez přímého kontaktu, a to pouze v případě, pokud jsou tyto vodivé částice dostatečně blízko sobě navzájem. Perkolační práh lze snadno určit z experimentální závislosti elektrické vodivosti kompozitního vodivého materiálu na koncentraci vodivého plniva, viz obr. 5.6 [14].



Obrázek 5.6: Elektrický odpor jako funkce obsahu vodivého plniva v materiálu.

Z uvedeného je zřejmé, že výrazný vliv na vodivost polymerního kompozitu má koncentrace vodivé komponenty. Kromě koncentrace vodivých částic záleží také na jejich typu, velikosti a tvaru. Např. snížení průměru kulových částic zapříčiní pokles perkolačního prahu. U částic, kde je poměr délky a tloušťky větší než 1 vede ke snížení perkolačního prahu zvýšení délky částic. Roli hraje také povrch částic a jejich kompatibilita s polymerem. Z hlediska vodivosti je výhodné, pokud existují velké difference mezi povrchovou energií vlákna a vodivé částice. Pro modelování vlivu koncentrace částic na vodivosti celého systému je třeba brát v úvahu i výše uvedené souvislosti.

Numerické modely elektrické vodivosti vícesložkových materiálů lze rozdělit do čtyř hlavních skupin. Jsou to modely statistické (např. KIRKPATRICK [15], BUECHE [16]), termodynamické (MAMUNYA [17, 18]), geometrické (MALLIARIS [19]) a strukturně orientované modely (např. práce NIELSENA [20]).

Velmi jednoduchý statistický model pro predikci vodivosti polymeru σ plněného vodivými částicemi s objemovým podílem V má tvar [14]

$$\sigma = \sigma_0(V - V_C)^S, \quad (5.22)$$

kde σ_0 je vodivost částic, V_C je perkolační práh. Exponent S závisí na rozměrech a struktuře částic.

BUECHE [16] se pokusil objasnit problematiku vodivých částic v izolační matici na principu gelace polymeru

$$\rho = \frac{\rho_m \rho_f}{(1 - V)\rho_f + V w_g \rho_m}, \quad (5.23)$$

kde ρ je rezistivita směsi, ρ_m je rezistivita nevodivého materiálu, ρ_f je rezistivita vodivého plniva, V je objemový podíl vodivé složky, w_g je hmotnostní podíl vodivé složky.

Pro některé aplikace vyhovuje dobře model popisující vodivost nad perkolačním prahem [14]

$$\log \sigma = \log \sigma_C + (\log \sigma_F - \log \sigma_C) \left(\frac{V - V_C}{F - V_C} \right)^K, \quad (5.24)$$

kde σ_C je elektrická vodivost na perkolačním prahu, σ_F je vodivost při maximální uspořádanosti vodivých částic, F je faktor maximálního uspořádání částic a konstanta K souvisí s povrchovým napětím mezi částicemi a polymerem.

5.4.2 Elektrická vodivost přízí

V praxi je velice obvyklá příprava vodivých přízí, které jsou tvořeny směsí vodivých (např. kovových, uhlíkových, bikomponentních) a nevodivých vláken, a to zejména kvůli požadovanému stupni vodivosti a příznivé finanční nákladnosti. Za účelem předpovězení vlastností takových přízí, aniž by byly vyrobeny, popř. optimalizace výrobku s ohledem na konkrétní aplikaci byly navrženy vztahy, pomocí kterých je možno predikovat elektrické chování přízí na základě znalosti parametrů vstupní suroviny – vlákna.

Vstupním parametrem příze je jemnost T . Pro idealizovanou přízi kruhového průřezu s konstantním zaplněním μ_C lze určit její průměr ze vztahu [67]

$$d = \frac{2\sqrt{T}}{\sqrt{10^6 \pi \rho_{wY}}}, \quad (5.25)$$

kde ρ_{wY} je neznámá měrná hmotnost příze. Tato měrná hmotnost je kombinací měrné hmotnosti vodivých a nevodivých vláken ρ_{wF} a vzduchu $\rho_{wa}=1000$ [kg.m⁻³] a závisí na zaplnění příze. Pro známé příze zaplnění příze je [67]

$$\rho_{wY} = \mu_C \rho_{wF}. \quad (5.26)$$

V případě směsi dvou vláken A (vodivé) a B (nevodivé) střední měrná hmotnost směsi vláken ρ_{wF} je možno vypočíst dle

$$\rho_{wF} = \frac{\rho_{wA}\rho_{wB}}{V\rho_{wB} + (1-V)\rho_{wA}}, \quad (5.27)$$

kde V je podíl vodivé složky ve směsi.

Hodnota měrné hmotnosti příze je tedy funkcí zákrutu, jemnosti a technologie výroby. Pro střední úrovně zákrutů lze použít empirický vztah [67]

$$\frac{\rho_{wY}}{\rho_{wF}} = \mu_C \approx 0.525. \quad (5.28)$$

Porozita příze P_Y je pak vyjádřena vztahem

$$P_Y = 1 - \mu_C. \quad (5.29)$$

Dle jednoduchého směšovacího pravidla může být měrná elektrická vodivost směsi dvou vláken σ_{AB} – A (vodivého vlákna s vodivostí σ_A) a B (nevodivého vlákna s vodivostí σ_B) vyjádřena pomocí vztahu

$$\sigma_{AB} = V\sigma_A + (1-V)\sigma_B. \quad (5.30)$$

Vstupní parametry vláken nutných pro výpočet elektrické vodivosti příze jsou: jemnost vlákna T_V [tex], měrná elektrická vodivost vlákenné suroviny σ_{AB} [S.m⁻¹], popř. měrný odpor ρ_{AB} [Ω.m], měrná hmotnost materiálu ρ_w [kg.m⁻³]. Vstupní parametry příze jsou: porozita P_Y [-] (resp. zaplnění) a orientace vláken z [-]. σ_a [S.m⁻¹] představuje vodivost vzduchu. Predikční semi-empirický model [68] má tvar:

$$\sigma_Y = \sigma_{AB} \frac{\sigma_a - \sigma_{AB}}{1 + \frac{1 - P_Y}{P_Y} \left[1 + z \frac{\sigma_a - \sigma_{AB}}{\sigma_a + \sigma_{AB}} \right]}, \quad (5.31)$$

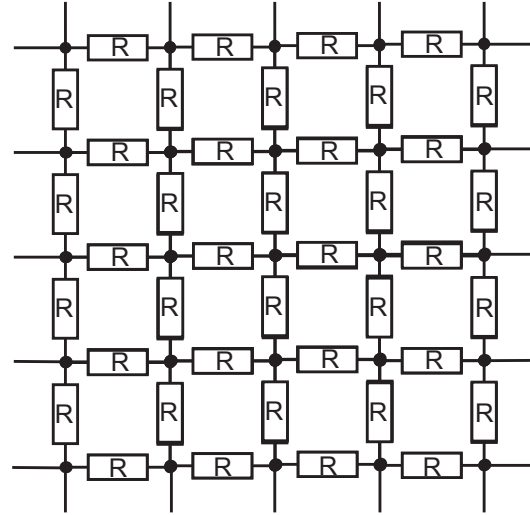
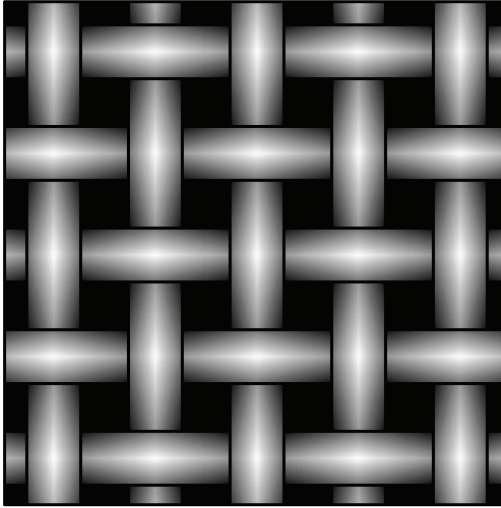
kde $z = 1$ pokud jsou všechna vlákna orientována kolmo ke směru toku elektronů, $z = 2/3$ pro náhodnou orientaci vláken a $z = 5/6$ v případě, že polovina vláken je náhodně orientována a druhá polovina je kolmá ke směru toku elektronů. Vodivost vzduchu σ_a je závislá na obsahu vlhkosti a teplotě. Pro suché podmínky může být σ_a zanedbána.

Modely elektrické vodivosti jsou často navrhovány pro předpověď vodivého chování materiálů obsahujících vodivou komponentu a dosažení efektivního materiálového designu.

5.4.3 Elektrická vodivost plošných textilií

Elektrické vlastnosti textilií nezávisí pouze na použitém materiálu, ale také na struktuře textilie. V této kapitole bude krátce pojednáno o dvou typech plošných textilních útvarů, tkanině v plátnové vazbě a pletenině.

Z elektrického pohledu může struktura textilního materiálu popsána jako soustava odporů. Jednotlivé odpory uvažované v tzv. mřížce odporů (viz obr. 5.7) jsou představovány odporem použité příze na jednotku délky. Individuální uzly není možno uvažovat



Obrázek 5.7: Elektrický obvod představující segment vodivé textilie [69, 70].

jako ideální spojení známé z teorie elektrických obvodů zejména z důvodu principu výroby textilie, popř. konkrétní vazby a jejich vlivu na strukturu provázání, tzn. kontaktů přízí ve vazebných bodech [69].

Celkový odpor textilie v plátnové vazbě může být jednoduše vyjádřen ve směru osnovy [70]

$$R_o = \frac{R_L(1 + C_o)(N_u - 1)}{N_o}, \quad (5.32)$$

ve směru útku

$$R_u = \frac{R_L(1 + C_u)(N_o - 1)}{N_u}, \quad (5.33)$$

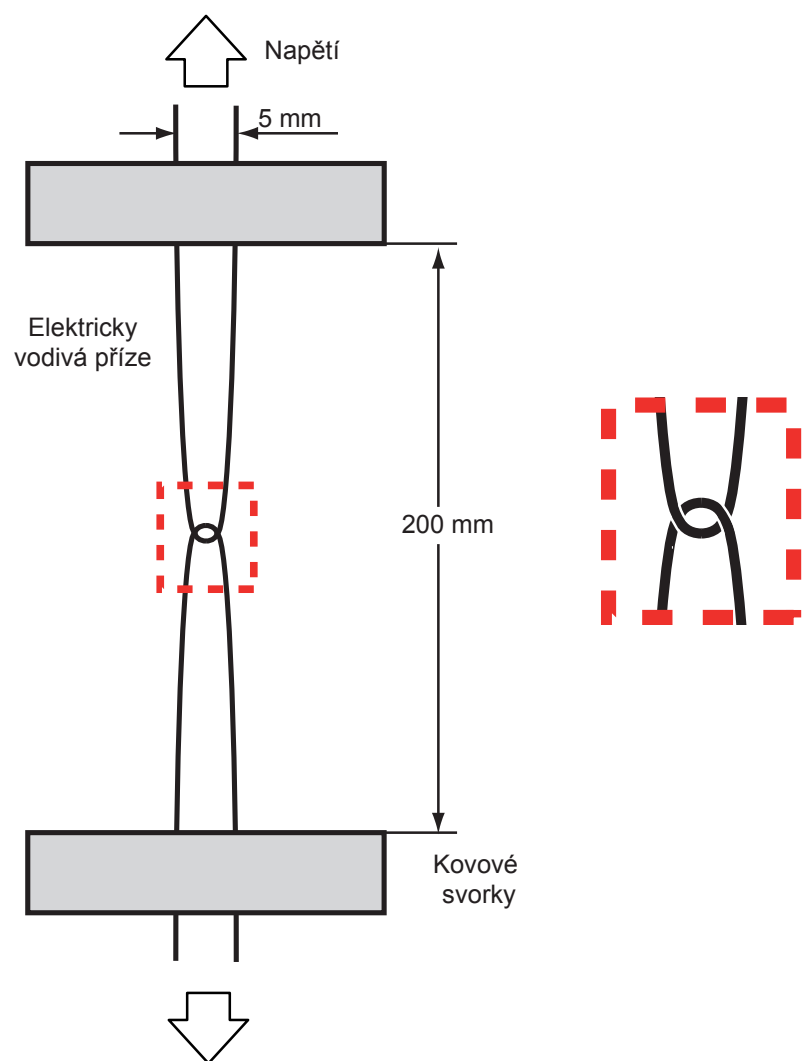
kde R_o, R_u jsou odpovídající výsledné elektrické odpory textilní struktury měřené ve směru osnovy a útku, N_u je dostava útku, N_o je dostava osnovy, R_L je elektrický odpor příze na jednotku délky, C_o a C_u jsou vazné vlny ve směru osnovy a útku.

Elektrické vlastnosti textilie ovlivňuje jak vlastní vodivost příze, tak kontaktní odpor ve vazných bodech. Vodivost příze je možno vypočítat pomocí Ohmova zákona, kontaktní odpor může být stanoven experimentálně. Možné odpovídající uskupení experimentu pro zjišťování kontaktního odporu v pletených strukturách je zobrazeno na obr. 5.8. Z provedených experimentů je zřejmé, že kontaktní odpor se snižuje se zvyšujícím se zatížením. Vztah mezi normálovou silou dvou provléknutých přízí a kontaktním odporem může být popsán pomocí následující funkce [70]

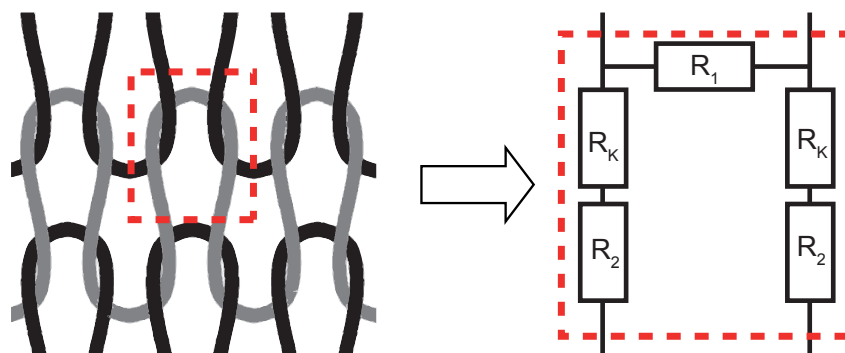
$$R_K = f(F_n), \quad (5.34)$$

kde funkce f je zjišťována experimentálně a F_n je normálová síla v bodě provázání.

Odpovídající odpor textilie může být poté stanoven na základě schématu elektrického obvodu (obr. 5.9).



Obrázek 5.8: Seskupení experimentu pro zjišťování kontaktního odporu [70].



Obrázek 5.9: Elektrický obvod představující základní očko pleteniny [70].

6 Experimentální část

6.1 Textilní délkové útvary

Tato podkapitola bude věnována studiu textilních lineárních útvarů (vláken, přízí), a to zejména s ohledem na jejich elektrickou vodivost (jež je jedním z stěžejních parametrů při konstrukci textilií odolných vůči elektrickému smogu) a mechanické vlastnosti.

6.1.1 Popis vzorků

Byly studovány čtyři skupiny délkových útvarů. Jedná se o příze elektricky nevodivé, příze antistatické, příze hybridní a kovový drát. Jednotlivé lineární útvary byly zařazeny do skupin s ohledem na velikost jejich elektrické vodivosti. Příze elektricky nevodivé a kovový drát byly do studie zařazeny za účelem možnosti porovnání elektrické vodivosti.

Jako představitelé skupiny nevodivých přízí byly zvoleny příze materiálového složení 100% CO a 100% PES. Mezi zástupce skupiny přízí antistatických patří příze obchodního označení Beltron a Resistat obsahující ve své struktuře kromě klasických nevodivých vláken (PES) také bikomponentní vlákna se zvýšenou vodivostí. Použitá bikomponentní vlákna jsou dvojího typu. Příze Beltron obsahuje část vláken, kde je vodivá uhlíková vrstva umístěna uvnitř vlákna, viz obr. 6.1. Vodivá uhlíková vrstva tvoří plášť nevodivému jádru u části vláken příze Resistat, viz obr. 6.2.

Hybridní příze se zvýšenou vodivostí

Směšováním klasických polypropylenových vláken (PP TREVON 2,2 dtex/50 mm) s vlákny kovovými (BEKINOX VS 08/050/2000 HCR, tloušťka cca 9 μm , jemnost 4 zdtex, délka vlákna 30 - 50 mm) bylo docíleno zvýšení elektrické vodivosti tzv. hybridních přízí (obr. 6.3) při zachování ostatních vlastností kladených na příze používané v textilním průmyslu, popř. v oděvnictví (nízká jemnost, příznivé mechanické vlastnosti, viz tabulka 6.1). Nerezová ocel byla zvolena vzhledem ke své dostatečně vysoké elektrické vodivosti, uspokojivé životnosti, flexibilitě a zejména kvůli odolnosti vůči korozi v prostředí běžného typu (voda, slabé alkálie, slabé kyseliny atd.). Odolnost vůči korozi představuje důležitý požadavek na použitý materiál zejména díky plánované údržbě oděvů vyrobených z hybridních přízí praním. Nerezová ocelová vlákna obchodního označení Bekinox vyrábí belgická společnost Bekaert. Mezi hlavní komponenty této slitiny patří: Fe 68 %, Cr 18 %, Ni 12 %, Mo 2 %. Hybridní příze byly navrženy a vyrobeny ve spolupráci se společností Sintex, a.s.

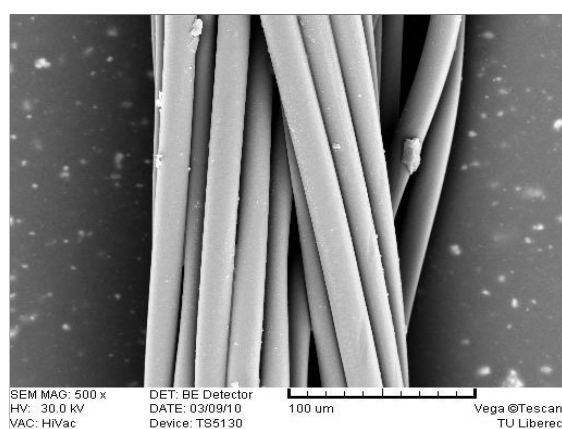
Tabulka 6.1: Vlastnosti vláken použitých pro konstrukci hybridních přízí.

Vlákno	Jemnost [tex]	Délka [mm]	Poměrná pevnost [cN/tex]	Prodloužení [%]	Modul pružnosti [cN/dtex]
Bekinox	3.85	40	14.35	1.29	111.56
PP	2.20	50	34.83	57.57	24.95

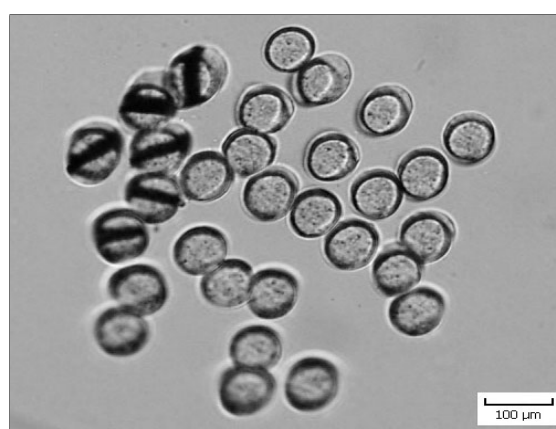
Bylo využito bavlnářského technologického postupu výroby přízí zahrnující přípravu k předení, mykání, protahování, předpřádání a dopřádání. Pramen se staplovým kovovým vláknem byl do výrobního procesu začleněn ve fázi protahování. Hybridní příze s různým obsahem vodivé komponenty byly vytvořeny ve dvou odlišných jemnostech. Vzorky označené H1 až H20 představují příze jemnosti 25 tex a obsahem vodivého vlákna v rozmezí 1 % - 20 %. Vzorky označené H20-50 až H60-50 zastupují hybridní příze jemnosti 50 tex a obsahu kovového vlákna od 20 % do 60 %. Do studie elektrické vodivosti byla zařazena také vlákna, která tvoří základní komponentu hybridních přízí, tj. vlákno polypropylénové a vlákno Bekinox. Hybridní příze a z nich vytvořené plošné textilie tvoří stěžejní část předložené práce. Základní specifikace všech délkových útvarů je uvedena v tabulce 6.2.

Tabulka 6.2: Parametry studovaných délkových útvarů.

Označení	Materiálové složení	Jemnost [tex]
PES	100% PL hedvábí	16
CO	100% CO příze	19
Drát	100% ocelový drát ME	14
Beltron	86 dtex f24 PESh + 24 dtex f6 Beltron B31	11
Resistat	81 dtex f35 PESh + 25 dtex f1 Resistat F9601	11
Bekinox vlákno	100% SS	0.4
PP vlákno	100% PP	0.22
H1	99 % PP/1 % SS	25
H3	97 % PP/3 % SS	25
H5	95 % PP/5 % SS	25
H10	90 % PP/10 % SS	25
H15	85 % PP/15 % SS	25
H20	80 % PP/20 % SS	25
H20-50	80 % PP/20 % SS	50
H40-50	60 % PP/40 % SS	50
H60-50	40 % PP/60 % SS	50

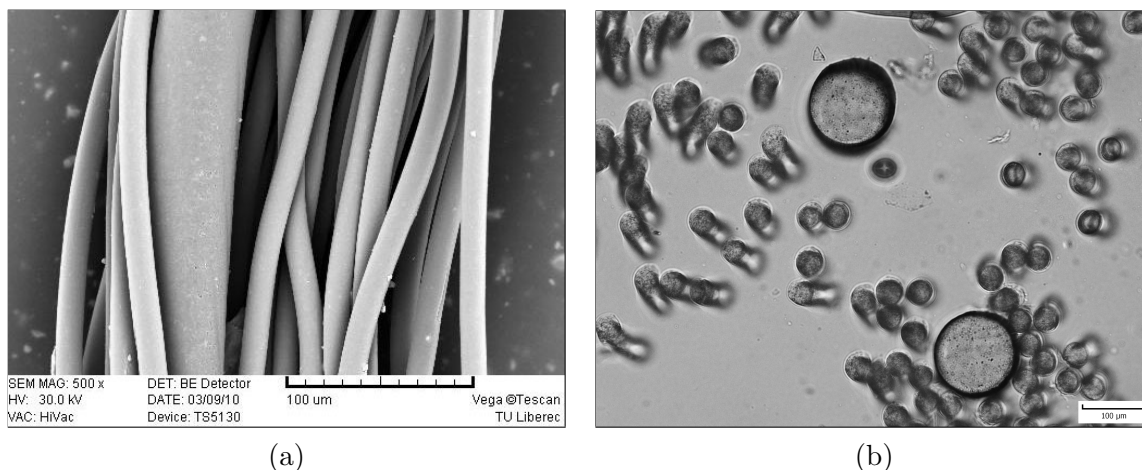


(a)

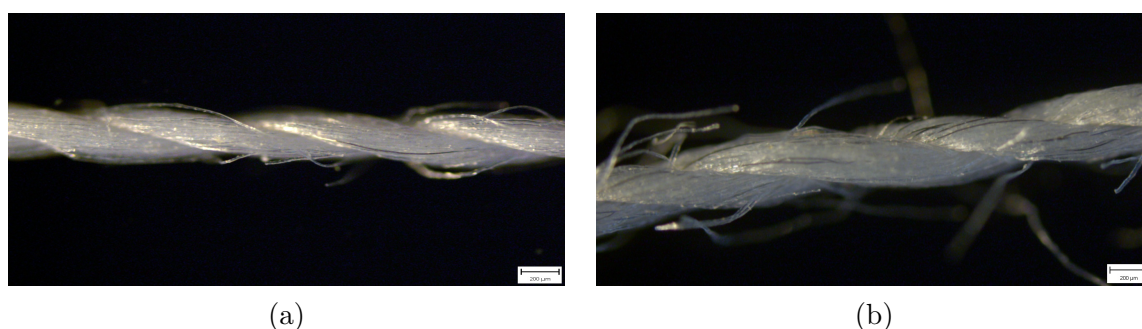


(b)

Obrázek 6.1: Mikroskopické snímky příze Beltron: (a) podélný pohled , (b) příčný řez. Vodivá komponenta Beltron B31 obsahuje uhlíkovou vrstvu uvnitř PES vlákna.



Obrázek 6.2: Mikroskopické snímky příze Resistat: (a) podélný pohled; (b) příčný řez. Vodivá komponenta Resistat F9601 obsahuje na povrchu PA vlákna uhlíkovou vrstvu.



Obrázek 6.3: Mikroskopické snímky hybridní příze obsahující: (a) 1 %, (b) 20 % vodivé komponenty.

6.1.2 Studium elektrické vodivosti

Jak bylo zmíněno výše, dostatečně vysoká elektrická vodivost je jedním z nejdůležitějších požadavků pro tvorbu bariér odolných vůči průchodu elektromagnetického záření. Z toho důvodu byla z hlediska elektrického chování prostudována sada vzorků odlišného materiálového složení. Studována byla jak samotná výše schopnosti příze vést elektrický proud při určité délce příze, tak závislost elektrického odporu na různé upínací délce.

Tato kapitola obsahuje jak popis metodiky měření elektrické vodivosti, resp. elektrického odporu, tak statistické vyhodnocení naměřených dat a následně grafické vyhodnocení studovaných závislostí spolu s diskusí a vyslovením platných závěrů.

Hodnocení elektrické vodivosti

K měření elektrického odporu byl použit přístroj High Resistance Meter 4339B Hewlett Packard resp. digitální multimeter Agilent 34401A. Délkové textilní útvary (vlákna, příze) byly při měření upínány do elektrodového systému přípravku vyvinutého v rámci této disertační práce (obr. 5.3). Přípravek se skládá z nosné elektricky nevodivé podložky a dvou elektrod ve tvaru svorek. Jedna z elektrod je pevná, druhá je posuvná na stupnici od 10 do 300 mm s krokem 50 mm. Měřený materiál se upne do elektrodového systému pomocí kovových svorek (materiál svorek je volen tak, aby elektrický odpor přechodových kontaktů byl zanedbatelný vůči elektrickému odporu měřeného materiálu) a měří se elektrický odpor mezi elektrodami. Pomocí postupné změny upínací délky vzorku ($L = 10\text{--}300\text{ mm}$) se proměří závislost elektrického odporu na délce

lineárního textilního útvaru. Při každé upínací délce bylo proměřeno až 50 vzorků, a to zejména z důvodu relativně vysoké variability elektrické vodivosti hybridních přízí. Měření elektrického odporu bylo provedeno při klimatických podmínkách $T_P = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$, $\varphi = (40 \pm 2)\%$, což je v souladu s normou ČSN 80 0059. Testovací napětí $U = 10\text{ V}$ bylo použito pro hodnoty elektrického odporu do $10^5\ \Omega$ a $U = 100\text{ V}$ pro vyšší odpory (ČSN EN 61340-5-2).

Na základě rozsáhlých experimentů bylo zjištěno, že kontaktní odpor vznikající na styku mezi měřeným materiálem a kovovou svorkou může zvýšit chybu měření až o 10 %, což je prakticky velmi omezující. Při měření elektrického odporu určitého úseku příze byla v experimentální části práce s výhodou využita inovovaná metodika měření elektrického odporu délkových textilních útvarů vyvinutá v rámci řešení disertační práce. Tato metodika měření předchází problémy způsobené kontaktními odpory a poskytuje měření bez chyb způsobených neideálními kontakty v místě styku vzorku se svorkou s vyšší přesností a reprodukovatelností. Podstata řešení spočívá v měření elektrického odporu na nejméně dvou definovaných úsecích délkového textilního útvaru a následném výpočtu elektrického odporu, který není zatížen chybou způsobenou kontaktním odporem. Popis inovované metodiky měření povrchového odporu délkových textilních útvarů s eliminací kontaktních odporů spolu s odvozením výpočtu výsledného elektrického odporu nezatíženého chybou nalezne čtenář v kapitole 5.3.1.

Statistické vyhodnocení naměřených dat

S využitím testu kombinace výběrové šikmosti a špičatosti bylo zjištěno, že naměřená data nepochází z normálního rozdělení, tzn. nebyl potvrzen předpoklad, že šikmost $g_1 = 0$ a špičatost $g_2 = 3$. Pro porovnání výběrového rozdělení s rozdělením teoretickým bylo využito konstrukce pravděpodobnostních grafů (porovnání distribuční funkce výběru se standardizovanou distribuční funkcí zvoleného teoretického rozdělení). Nejvyšší shoda rozdělení výběru byla pozorována s teoretickým rozdělením Laplaceovým, viz obr. 6.4.

Jak je uvedeno v [72] Laplaceovo (oboustranné exponenciální rozdělení se vyskytuje v případech, kdy jsou veličiny měřeny za podmínek kolísání rozptylu kolem určité střední hodnoty. Hustota pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny x ležící v intervalu $(-\infty, \infty)$ s Laplaceovým rozdělením má tvar

$$f(x) = 0.5\Phi^{-1}\exp\left(-\frac{|x - \Theta|}{\Phi}\right). \quad (6.1)$$

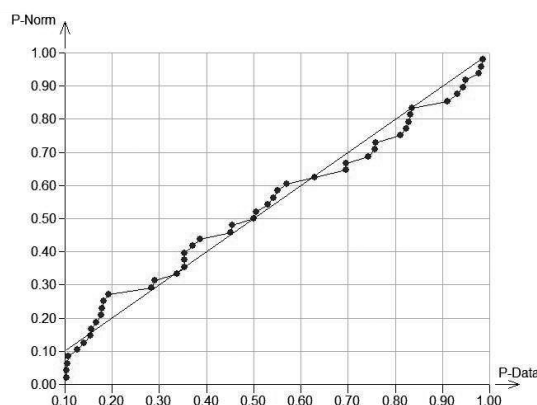
Střední hodnota Laplaceova rozdělení je $E(x) = \Theta$, rozptyl $D(x) = 2\Phi^2$. Laplaceovo rozdělení připouští výskyt výrazněji odchýlených hodnot a využívá se jako „robustní“ alternativa normálního rozdělení. *Výběrový medián* $\tilde{x}_{0.5}$ se s výhodou využívá jako maximálně věrohodný odhad parametru Θ .

Variabilita mediánu byla vyjádřena robustním intervalem spolehlivosti $I_D \leq \tilde{x}_{0.5} \leq I_H$. Pro meze tohoto intervalu platí vztahy [72]

$$I_D = \tilde{x}_{0.5} - \frac{1.57R_F}{\sqrt{n}}, \quad (6.2)$$

$$I_H = \tilde{x}_{0.5} + \frac{1.57R_F}{\sqrt{n}}, \quad (6.3)$$

kde R_F je mezikvartilové rozpětí, pro které platí $R_F = \tilde{x}_{0.75} - \tilde{x}_{0.25}$.



Obrázek 6.4: Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením elektrického odporu příze s teoretickým Laplaceovým rozdělením.

V tabulkách 6.3 až 6.7 jsou uvedeny hodnoty mediánu elektrického odporu $[\Omega]$ pro jednotlivé upínací délky L [m] spolu s intervaly spolehlivosti veškerých studovaných přízí a vláken.

Tabulka 6.3: Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu při různých upínacích délkách nevodivých přízí a drátu.

Upínací délka [mm]	Elektrický odpor R [Ω]					
	PL		CO		Drát	
	\tilde{x}	95% IS	\tilde{x}	95% IS	\tilde{x}	95% IS
10	8.78E+12	$\pm 1.96\text{E}+12$	5.07E+11	$\pm 6.64\text{E}+10$	5.83	± 0.41
50	2.92E+13	$\pm 3.46\text{E}+13$	3.64E+12	$\pm 1.11\text{E}+12$	20.00	± 0.54
100	4.79E+13	$\pm 1.02\text{E}+13$	5.77E+12	$\pm 2.32\text{E}+12$	39.69	± 0.24
150	6.72E+13	$\pm 1.03\text{E}+13$	8.58E+12	$\pm 1.88\text{E}+12$	60.58	± 1.17
200	1.15E+14	$\pm 1.66\text{E}+13$	1.20E+13	$\pm 2.53\text{E}+12$	78.96	± 0.27
250	1.36E+14	$\pm 2.41\text{E}+13$	1.40E+13	$\pm 2.38\text{E}+12$	99.06	± 0.27
300	1.61E+14	$\pm 3.54\text{E}+13$	1.72E+13	$\pm 4.71\text{E}+12$	117.86	± 0.16

Tabulka 6.4: Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu antistatických přízí Beltron a Resistat při upínací délce 10 mm.

Upínací délka [mm]	Elektrický odpor R [Ω]			
	Beltron		Resistat	
	\tilde{x}	95% IS	\tilde{x}	95% IS
10	6.30E+07	$\pm 1.59\text{E}+06$	2.98E+05	$\pm 8.18\text{E}+03$
50	2.64E+08	$\pm 1.69\text{E}+07$	1.60E+06	$\pm 3.62\text{E}+04$
100	5.25E+08	$\pm 7.96\text{E}+06$	3.04E+06	$\pm 3.58\text{E}+04$
150	7.39E+08	$\pm 1.32\text{E}+07$	4.74E+06	$\pm 3.38\text{E}+04$
200	9.54E+08	$\pm 4.35\text{E}+07$	6.18E+06	$\pm 6.35\text{E}+04$
250	1.23E+09	$\pm 6.39\text{E}+06$	8.04E+06	$\pm 1.12\text{E}+05$
300	1.46E+09	$\pm 2.43\text{E}+07$	9.23E+06	$\pm 5.68\text{E}+04$

Tabulka 6.5: Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu vlákna polypropylénového a vlákna Bekinox.

Upínací délka [mm]	Elektrický odpor R [Ω]			
	Bekinox vlákno		PP vlákno	
	\tilde{x}	95% IS	\tilde{x}	95% IS
10	298	± 36	3.12E+12	$\pm 4.83\text{E}+11$

Tabulka 6.6: Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu při různých upínacích délkách hybridních přízí s jemností 25 tex.

Upínací délka [mm]	Elektrický odpor R [Ω]					
	H1		H3		H5	
	\tilde{x}	95% IS	\tilde{x}	95% IS	\tilde{x}	95% IS
10	1.59E+12	$\pm 5.10\text{E}+10$	7.47E+11	$\pm 2.80\text{E}+11$	4.01E+11	$\pm 8.79\text{E}+10$
25	NaN	NaN	2.26E+12	$\pm 1.01\text{E}+12$	4.33E+11	$\pm 1.71\text{E}+11$
50	NaN	NaN	NaN	NaN	3.95E+12	$\pm 9.24\text{E}+11$
100	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
150	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
200	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
250	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
300	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	H10		H15		H20	
10	5.76E+02	$\pm 1.15\text{E}+02$	1.88E+2	$\pm 6.5\text{E}+00$	1.55E+02	$\pm 1.07\text{E}+01$
25	1.08E+03	$\pm 2.24\text{E}+02$	7.15E+02	$\pm 5.26\text{E}+01$	5.00E+02	$\pm 3.71\text{E}+01$
50	7.10E+03	$\pm 1.38\text{E}+03$	4.29E+04	$\pm 3.65\text{E}+04$	1.54E+03	$\pm 3.65\text{E}+01$
75	1.11E+11	$\pm 4.87\text{E}+10$	6.19E+05	$\pm 1.28\text{E}+05$	8.75E+03	$\pm 5.46\text{E}+03$
100	1.88E+11	$\pm 7.24\text{E}+10$	8.58E+05	$\pm 6.44\text{E}+05$	2.65E+04	$\pm 9.78\text{E}+03$
125	5.08E+11	$\pm 1.44\text{E}+11$	1.99E+06	$\pm 5.91\text{E}+05$	2.29E+04	$\pm 1.38\text{E}+04$
150	3.48E+11	$\pm 1.80\text{E}+11$	1.96E+06	$\pm 7.23\text{E}+05$	6.83E+04	$\pm 1.88\text{E}+04$
175	6.80E+11	$\pm 9.89\text{E}+10$	4.80E+06	$\pm 8.82\text{E}+05$	6.31E+04	$\pm 3.58\text{E}+04$
200	5.97E+11	$\pm 2.41\text{E}+11$	8.74E+06	$\pm 2.08\text{E}+05$	1.18E+05	$\pm 2.41\text{E}+04$
250	1.54E+12	$\pm 4.83\text{E}+11$	1.66E+07	$\pm 3.71\text{E}+06$	2.15E+05	$\pm 3.50\text{E}+04$
300	2.64E+12	$\pm 3.79\text{E}+11$	1.19E+07	$\pm 3.43\text{E}+06$	2.20E+05	$\pm 3.24\text{E}+04$

Poznámka: NaN - neměřitelná hodnota elektrického odporu, mimo rozsah měřícího zařízení.

Tabulka 6.7: Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu při různých upínacích délkách přízí hybridních o jemnosti 50 tex.

Upínací délka [mm]	Elektrický odpor R [Ω]					
	H20-50		H40-50		H60-50	
	\tilde{x}	95% IS	\tilde{x}	95% IS	\tilde{x}	95% IS
10	1.73E+02	$\pm 4.85\text{E}+01$	3.49E+01	$\pm 6.22\text{E}+00$	2.43E+01	$\pm 3.40\text{E}+00$
25	3.14E+02	$\pm 8.00\text{E}+01$	6.39E+01	$\pm 4.29\text{E}+00$	3.62E+01	$\pm 4.24\text{E}+00$
50	1.43E+03	$\pm 5.72\text{E}+02$	9.36E+01	$\pm 1.80\text{E}+01$	5.57E+01	$\pm 6.60\text{E}+00$
75	1.96E+03	$\pm 6.32\text{E}+02$	1.71E+02	$\pm 1.49\text{E}+01$	8.53E+01	$\pm 5.56\text{E}+00$
100	2.21E+03	$\pm 6.80\text{E}+02$	2.15E+02	$\pm 1.46\text{E}+01$	9.57E+01	$\pm 1.51\text{E}+01$
125	4.23E+03	$\pm 1.14\text{E}+03$	2.92E+02	$\pm 3.81\text{E}+01$	1.35E+02	$\pm 2.17\text{E}+01$
150	4.71E+03	$\pm 1.68\text{E}+03$	4.07E+02	$\pm 7.51\text{E}+01$	1.49E+02	$\pm 2.15\text{E}+01$
175	5.47E+03	$\pm 1.24\text{E}+03$	4.60E+02	$\pm 6.88\text{E}+01$	1.90E+02	$\pm 8.31\text{E}+00$
200	7.04E+03	$\pm 1.82\text{E}+03$	5.80E+02	$\pm 1.15\text{E}+02$	2.36E+02	$\pm 2.23\text{E}+01$
250	1.11E+04	$\pm 2.85\text{E}+03$	9.79E+02	$\pm 2.32\text{E}+02$	2.90E+02	$\pm 4.26\text{E}+01$
300	1.55E+04	$\pm 3.28\text{E}+03$	1.10E+03	$\pm 1.65\text{E}+02$	3.68E+02	$\pm 2.98\text{E}+01$

Závislost elektrického odporu na upínací délce

Jednou ze základních vlastností materiálů je elektrická vodivost σ [$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$], která charakterizuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Reciprokou hodnotu elektrické vodivosti představuje měrný elektrický odpor ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]. Celkový elektrický odpor vodivého materiálu R [Ω] je přímo úměrný délce L a nepřímo úměrný jeho elektrické vodivosti σ a ploše příčného řezu S [m^2]

$$R = \frac{L}{\sigma S}. \quad (6.4)$$

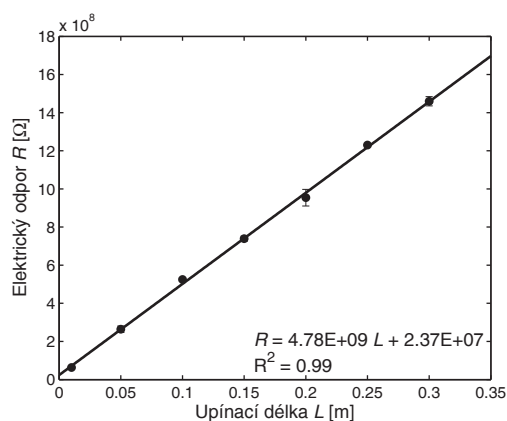
Závislost elektrického odporu na délce popisuje přímka se směrnici $(\sigma \cdot S)^{-1}$.

Byla prozkoumána závislost elektrického odporu na upínací délce pro veškeré studované lineární útvary. Bylo zjištěno, že příze nevodivé a příze, které obsahují vodivou komponentu spojitě po celé své délce (např. příze Beltron a Resistat) vykazují lineární závislost elektrického odporu na upínací délce, obrázek 6.5. Z obrázku je patrné, že nejnižších hodnot elektrického odporu dosahuje kovový drát, vyšších hodnot elektrického odporu v porovnání s kovovým drátem dosahují tzv. antistatické příze (Beltron, Resistat), nejvyšších hodnot elektrického odporu pak dosahuje tzv. příze nevodivá. Lze pozorovat relativně vysokou variabilitu elektrického odporu polyesterové příze měřeného na delších upínacích délkách. Naproti tomu, variabilita elektrického odporu měřeného u přízí antistatických či kovového drátu je relativně nízká.

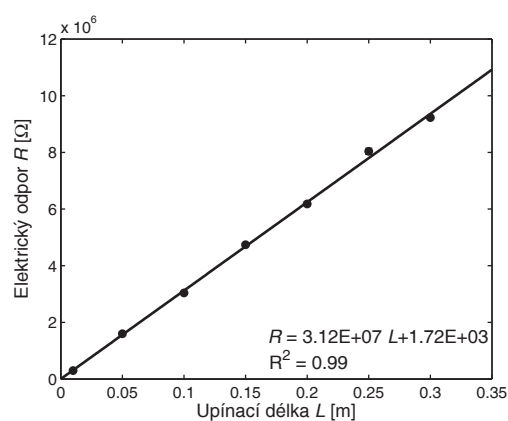
Směrnice přímky získané pomocí lineární regrese (metoda nejmenších čtverců) představuje hodnotu délkové rezistivity R_L [$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$]. Na základě znalosti jemnosti délkového útvaru je možno také stanovit hmotnostní rezistivitu délkového útvaru R_w [$\Omega \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$], viz kapitola 5.3.1. V tabulce 6.13 jsou uvedeny hodnoty délkové a hmotnostní rezistivity pro celou skupinu studovaných délkových útvarů.

Tabulka 6.8: Hodnoty délkové a specifické rezistivity vzorků přízí.

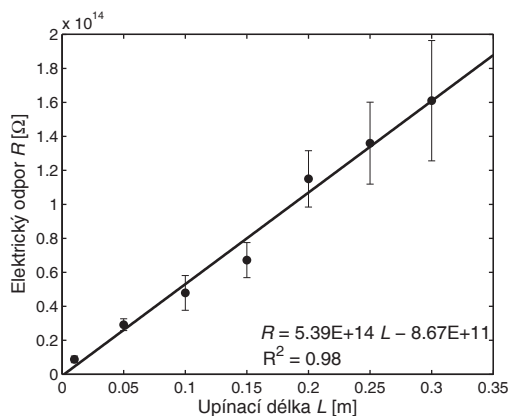
Označení	Délková rezistivita R_L [$\Omega \cdot m^{-1}$]		Hmotnostní rezistivita R_w [$\Omega \cdot g \cdot cm^{-2}$]	
	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
PL	5.39E+14	$\pm 7.52E+13$	8.62E+10	$\pm 1.20E+10$
Drát	3.89E+02	$\pm 6.78E+00$	5.12E-02	$\pm 9.50E-04$
Beltron	4.78E+09	$\pm 1.67E+08$	5.26E+05	$\pm 1.83E+04$
Resistat	3.13E+07	$\pm 1.32E+06$	3.44E+03	$\pm 1.46E+02$
Bekinox vlákno	2.95E+04	$\pm 3.59E+03$	1.18E-01	$\pm 1.43E-04$
PP vlákno	3.12E+14	$\pm 4.83E+13$	6.87E+8	$\pm 1.06E+06$



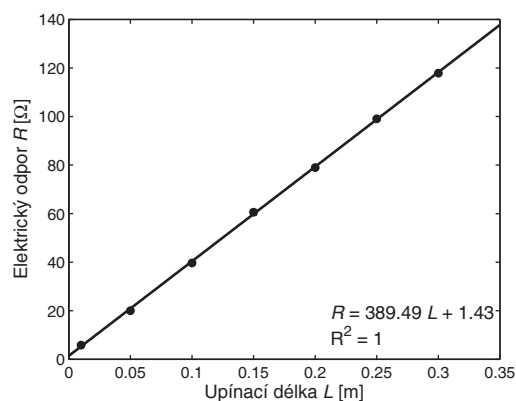
(a)



(b)



(c)



(d)

Obrázek 6.5: Závislost elektrického odporu na upínací délce L pro (a) přízi Beltron, (b) přízi Resistat, (c) přízi PL a (d) kovový drát.

Nelineární závislost elektrického odporu na upínací délce

V případě hybridních přízí (vzorek H1-H20) obsahujících ve své struktuře velmi jemná kovová vlákna konečné délky bylo rozsáhlými experimenty prokázáno, že elektrický odpor R je nelineární konvexně rostoucí funkcí upínací délky příze L , viz obr. 6.6. Tento jev je v rozporu s chováním kovů a některých kompozitních materiálů.

Za účelem modelování této závislosti byl navržen jednoduchý mechanistický model založený na velmi jednoduchém předpokladu přímé úměrnosti rychlosti změny elektrického

odporu na efektivní délce příze. Odpovídající rovnice má tvar

$$\frac{dR}{dl} = \alpha L^n, \quad (6.5)$$

kde α je součinitel úměrnosti (součinitel specifické rezistivity) a n je faktor spojený s útlumem elektrické vodivosti. Výsledný model je získán integrací rovnice 6.5 od R_0 do $R(L)$ a od 0 do L . Tento model má tvar

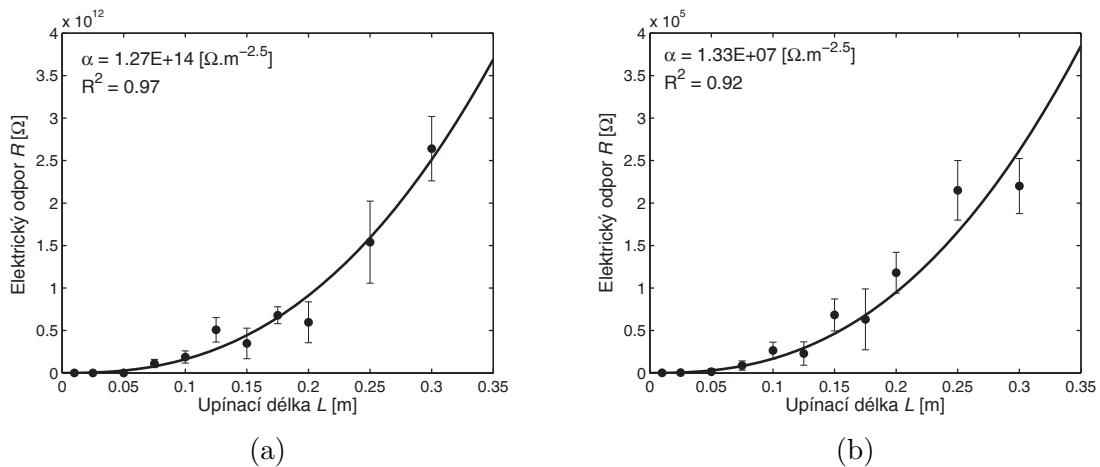
$$R(L) = \int_0^L \alpha l^n dL = R_0 + \frac{\alpha}{n+1} L^{n+1}. \quad (6.6)$$

Odpor vodiče nulové délky by měl být ve skutečnosti nula a proto $R_0 = 0$. V případě ideálního vodiče $n = 0$ a elektrický odpor je lineární funkcí délky příze. V případě $n = 1$ je aktuální elektrický odpor kvadratickou funkcí délky příze a součinitel α má rozměr $[\Omega \cdot \text{m}^{-2}]$. Je snadné si představit α jako odpor na délce $l = 1$ m a proto se nazývá součinitel specifického měrného odporu. Použitím rovnice (6.7) je možno vypočítat útlum elektrické vodivosti mezi vybranými délkami L_1 a $L_2 > L_1$. Útlum $AF(L_1, L_2)$ [dB] elektrické vodivosti mezi délkami L_1 a L_2 může být vyjádřen ve tvaru

$$AF(L_1, L_2) = 10 n \log \left(\frac{L_2}{L_1} \right). \quad (6.7)$$

Je zřejmé, že pro zvolené délky L_1 a L_2 je útlum elektrické vodivosti přímo úměrný činiteli n .

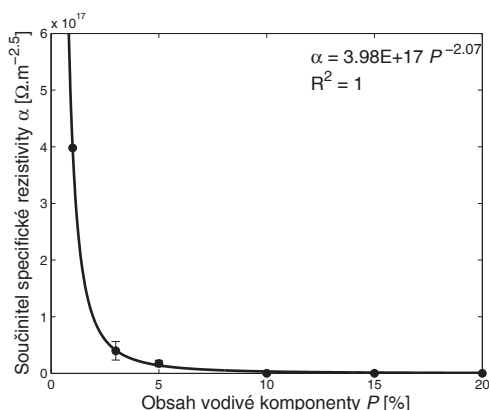
V tabulce 6.9 jsou zobrazeny hodnoty součinitele specifického odporu α , který byl stanoven pomocí lineární regrese dle (6.6). Faktor $n = 1.5$ pro příze jemnosti 25 tex. Stanovený součinitel specifické rezistivity α je možno použít pro hodnocení přízí s odlišným obsahem vodivé komponenty P a predikci perkolační prahu, přičemž právě perkolační práh je hlavním faktorem určujícím vodivost daného hybridního materiálu. Jedná se o kritický obsah vodivé komponenty, při kterém se daný materiál začne chovat jako vodič, viz kapitola 5.4.1. To umožňuje optimalizaci množství poměrně finančně nákladných kovových vláken pro získání dostatečně vodivé příze vhodné např. pro konstrukci bariér odolných proti průchodu elektromagnetického záření.



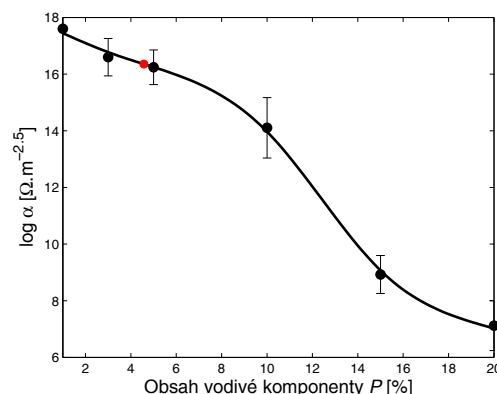
Obrázek 6.6: Závislost elektrického odporu na upínací délce pro hybridní přízi jemnosti 25 tex označené (a) H10 - obsahující 10 % vodivé komponenty, (b) H20 - obsahující 20 % vodivé komponenty.

Tabulka 6.9: Hodnoty součinitele specifické rezistivity vzorků hybridních přízí.

Označení	Součinitel specifické rezistivity α [$\Omega \cdot \text{m}^{-2.5}$]	
	\bar{x}	95% IS
H1	3.98E+17	NaN
H3	5.85E+16	$\pm 1.64\text{E}+16$
H5	1.75E+16	$\pm 5.65\text{E}+15$
H10	1.27E+14	$\pm 1.19\text{E}+13$
H15	8.45E+08	$\pm 2.29\text{E}+08$
H20	1.33E+07	$\pm 2.03\text{E}+06$



(a)



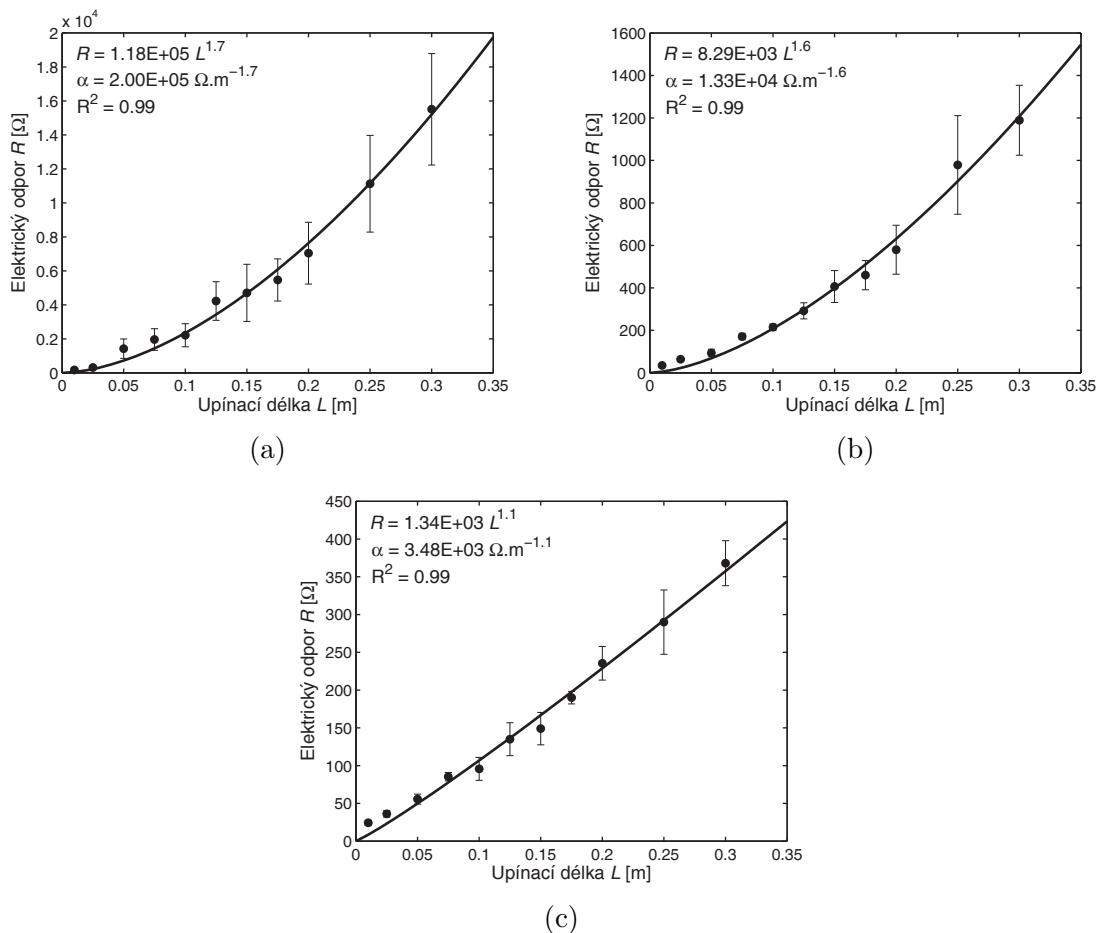
(b)

Obrázek 6.7: Závislost (a) specifické rezistivity α (b) logaritmu součinitele specifické rezistivity na obsahu vodivé komponenty P . Inflexní bod je vyznačen červenou barvou.

V průběhu řešení bylo potvrzeno, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty P v přízi klesá součinitel specifické rezistivity α , resp. zvyšuje se elektrická vodivost příze. Závislost součinitele specifické rezistivity na obsahu vodivé komponenty je zobrazena na obr. 6.7(a). Pro lepší přehlednost je na obr. 6.7(b) zobrazena závislost logaritmu součinitele specifické rezistivity na obsahu vodivé komponenty, neboli perkolační křivka. U většiny materiálů má tato závislost esovitý charakter, přičemž v prvním inflexním bodě křivky můžeme odečíst kritickou koncentraci, resp. perkolační mez [15].

Zvyšováním obsahu nerezového ocelového vlákna v materiálu při koncentraci, kdy se vodivé částice začnou dotýkat a vytváří makroskopickou síť vodivých řetězců (oblast perkolace) vodivost vzroste, resp. rezistivita klesne o několik řádů skokem a postupně se tak blíží vodivosti, resp. rezistivitě plniva (nerezového ocelového vlákna). Závislost logaritmu součinitele specifické rezistivity byla aproximována kubickou vyhlazovací spline křivkou s tolerancí 0.3. Perkolační práh byl nalezen jako inflexní bod vyhlazovací křivky a pohybuje se okolo 5 % vodivé komponenty (viz obr. 6.7(b), inflexní bod označen červenou barvou).

Závislost elektrického odporu na upínací délce byla studována také pro hybridní příze jemnosti 50 tex obsahující 20, 40, resp. 60 % nerezového ocelového vlákna (vzorky H20-50, H40-50, H60-50). I v tomto případě bylo potvrzeno, že elektrický odpor je R je nelineární konvexně rostoucí funkcí upínací délky příze L , viz obr. 6.8. Dále bylo



Obrázek 6.8: Závislost elektrického odporu na upínací délce pro hybridní přízi jemnosti 50 tex vzorků označených (a) H20-50 obsahující 20 % vodivé komponenty, (b) H40-50 obsahující 40 % vodivé komponenty a (c) H60-50 obsahující 60 % vodivé komponenty.

potvrzeno, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty P v přízi klesá součinitel specifické rezistivity α , resp. zvyšuje se elektrická vodivost příze. Bylo zjištěno, že faktor $n = 1.7$, resp. $n = 1.6$, resp. $n = 1.1$ pro příze obsahující 20, 40, resp. 60 % nerezového ocelového vlákna ve své struktuře. Z uvedeného je zřejmé, že dalším zvýšením obsahu vodivé komponenty v přízi ($P \rightarrow 100\%$) bude dosaženo spojitě elektricky vodivé dráhy po celé délce vzorku a závislost elektrického odporu na upínací délce získá lineární trend.

Na základě dalších experimentálních pokusů bylo zjištěno, že se zvyšujícím se zákrutem textilního délkového útvaru, který způsobuje zkrácení příze, a tedy vyšší koncentraci vodivé komponenty na určitém délkovém úseku, se zvyšuje i elektrická vodivost příze. Potvrzen byl také předpoklad vyšší vodivosti příze s totožným obsahem vodivé komponenty při zvýšení její jemnosti.

6.1.3 Studium vybraných mechanických vlastností

Cílem této podkapitoly bylo prozkoumat, zda zvýšená přítomnost vodivé komponenty (kovového staplového vlákna) ovlivňuje vybrané mechanické vlastnosti hybridních přízí označených H1-H20 jemnosti 25 tex, se zákrutem Z 620 z.m⁻¹.

Hodnocení mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti (pevnost, poměrná pevnost, tažnost) délkových textilií byly zjišťovány na přístroji INSTRON 4411 dle ČSN EN ISO 2062 (800700). Bylo proměřeno vždy 50 vzorků od každého typu hybridní příze.

Veličina rychlost šíření zvuku, pomocí níž je možno stanovit akustický dynamický modul, byla zjišťována pomocí přístroje Dynamic Modulus Tester LH-551. Princip spočívá v uchycení testovaného materiálu dvěma snímači, přičemž se měří rychlost šíření akustických pulzů v materiálu. Prakticky je při zkoušce měřena doba šíření akustického pulzu při různých upínacích délkách příze ($L = 1 - 30$ cm, s krokem 2.5 cm). Rychlost šíření akustického pulzu je následně stanovena z informací o čase a dráze pomocí lineární regrese. Pro rychlost šíření zvuku platí

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_w}}, \quad (6.8)$$

$$c = \sqrt{E_{spec}}, \quad (6.9)$$

$$E = c^2 \rho_w, \quad (6.10)$$

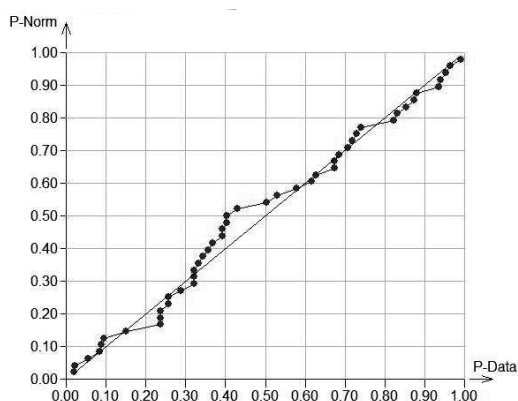
kde c - rychlost šíření zvuku [m.s⁻¹], ρ_w - hustota materiálu [kg.m⁻³], E - Youngův modul pružnosti [Pa], E_{spec} - specifický modul.

Pro stanovení hustoty směsi vláken ρ_{wF} (A-vodivé, B-nevodivé) bylo využito směsovacího pravidla dle rovnice (5.27). Pro hybridní přízí platí: $\rho_{wA} = 900$ kg.m⁻³, $\rho_{wB} = 8030$ kg.m⁻³.

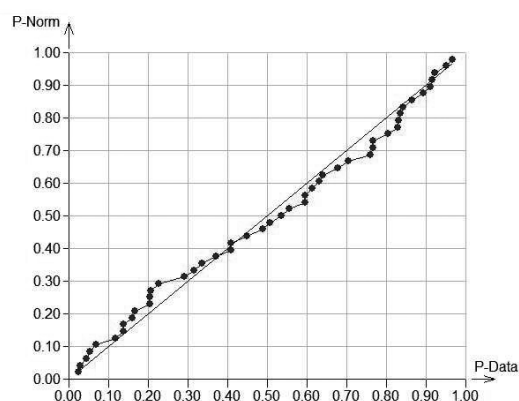
Hustota příze byla vypočtena dle vztahu (5.26), přičemž pro střední úrovně zákrutu bylo empiricky zjištěno, že $\mu_C \approx 0.525$ [73].

Statistické vyhodnocení naměřených dat

Testem kombinace výběrové šikmosti a špičatosti bylo potvrzeno, že odchylka šikmosti g_1 je nevýznamná od 0 a odchylka špičatosti g_2 je nevýznamná od 3, tzn. naměřená data vybraných mechanických charakteristik pochází z normálního rozdělení. Pro grafické porovnání výběrového rozdělení s teoretickým normálním rozdělením byl zvolen pravděpodobnostní graf, viz obr. 6.9. Lineární P-P graf s jednotkovou směrnici a nulovým úsekem ukazuje na shodu výběrového rozdělení s normálním rozdělením. Pro další interpretaci výsledků byl pro odhad střední hodnoty zvolen aritmetický průměr a 95% intervaly spolehlivosti. V tabulce 6.10 a 6.11 jsou uvedeny průměrné hodnoty jednotlivých měřených charakteristik spolu s intervaly spolehlivosti hybridních přízí s různým obsahem vodivé komponenty.



(a)



(b)

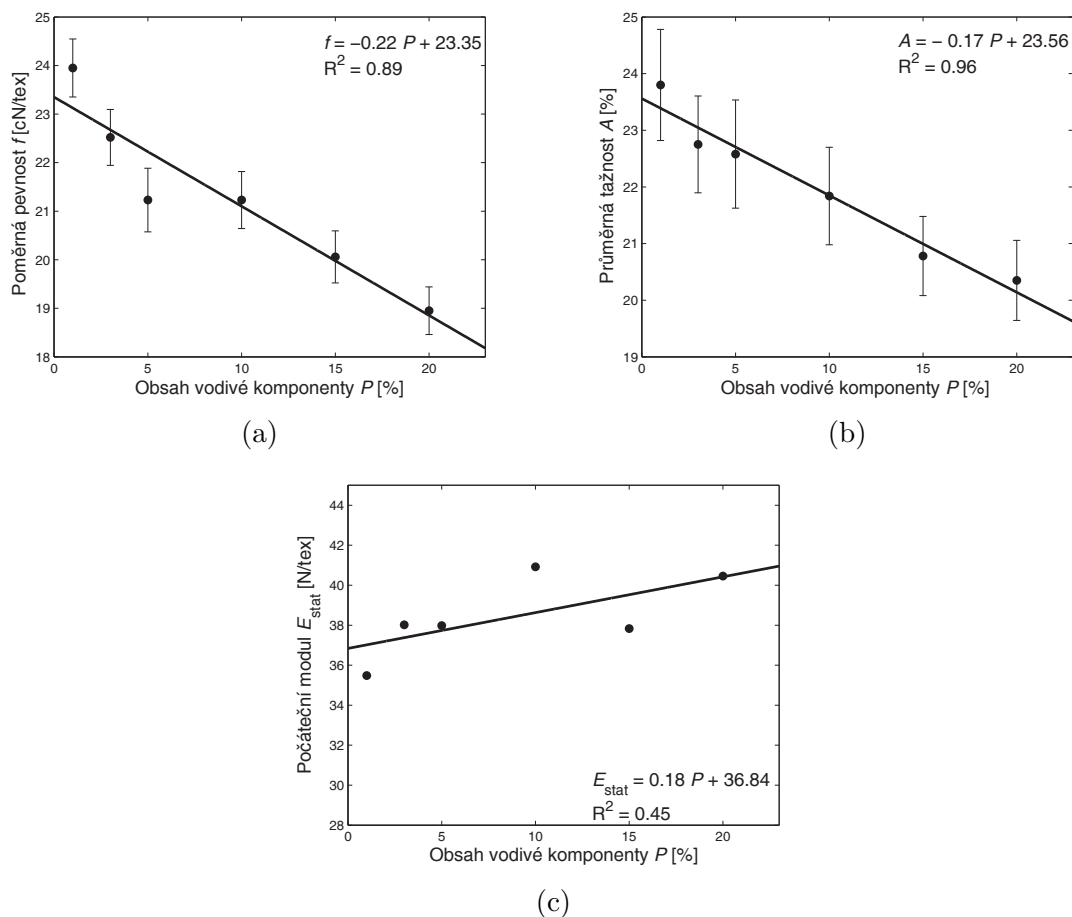
Obrázek 6.9: Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením (a) pevnosti, (b) tažnosti příze s normálním rozdělením.

Tabulka 6.10: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti poměrné pevnosti, tažnosti a počátečního modulu hybridních přízí jemnosti 25 tex.

Označení	Poměrná pevnost f [cN.tex ⁻¹]		Tažnost A [%]		Počáteční modul E [N.tex ⁻¹]
	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS	\bar{x}
H1	23.95	±0.60	23.80	±0.98	35.48
H3	22.52	±0.58	22.75	±0.86	38.02
H5	21.23	±0.66	22.58	±0.96	37.98
H10	21.23	±0.59	21.84	±0.86	40.92
H15	20.06	±0.54	20.78	±0.70	37.83
H20	18.95	±0.49	20.35	±0.71	40.46

Tabulka 6.11: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti rychlosti šíření zvuku a dynamického modulu hybridních přízí jemnosti 25 tex.

Označení	Hustota příze ρ_w [kg.m ⁻³]	Rychlost šíření zvuku c [m.s ⁻¹]		Dynamický modul E_{dyn} [N.tex ⁻¹]	
		\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
H1	454.03	1.92E+03	±19.61	3.69	±0.08
H3	462.32	1.94E+03	±20.29	3.76	±0.08
H5	470.91	1.95E+03	±13.72	3.80	±0.05
H10	493.85	2.00E+03	±14.74	4.01	±0.06
H15	519.14	1.99E+03	±15.58	3.98	±0.06
H20	547.17	2.05E+03	±19.43	4.21	±0.08



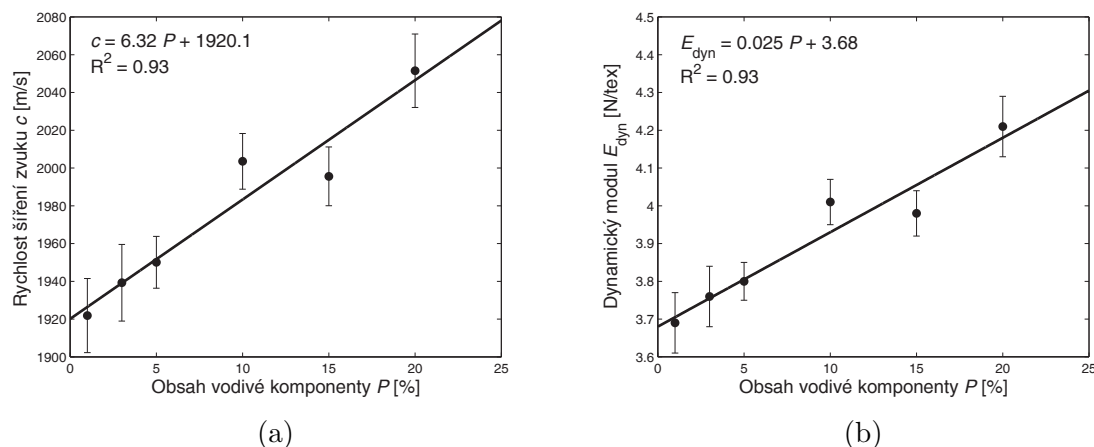
Obrázek 6.10: Závislost (a) poměrné pevnosti f , (b) tažnosti A a (c) počátečního modulu E na obsahu vodivé komponenty v přízi.

Vliv obsahu vodivé komponenty na vybrané mechanické vlastnosti

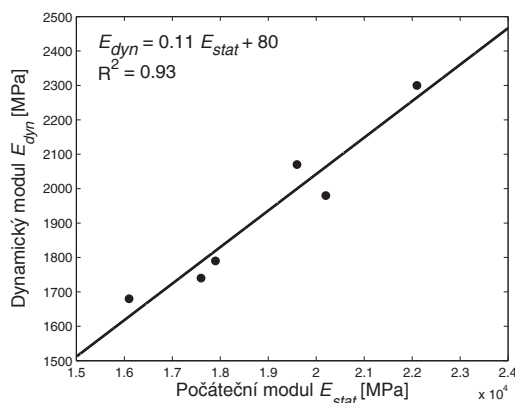
Na obr. 6.10 je zobrazena závislost poměrné pevnosti f , tažnosti A a počátečního modulu E příze na obsahu vodivé komponenty (kovového vlákna) přízí označeních H1-H20. Z grafického vyjádření průměrných hodnot je zřejmé, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty se snižuje poměrná pevnost i tažnost příze a naopak mírně stoupá její počáteční modul. Jednotlivé závislosti je možno popsat lineární regresní rovnicí.

Na obr. 6.11 je zobrazena závislost rychlosti šíření zvukového impulsu c a dynamického modulu E_{dyn} na obsahu vodivé komponenty (kovového staplového vlákna) v přízi. Z grafického vyobrazení je zřetelný lineární vzrůst rychlosti šíření zvuku se vzrůstajícím obsahem kovového vlákna v přízi. Stejný trend lze pozorovat u závislosti dynamického modulu na obsahu kovu ve vzorku. Obě studované závislosti lze popsat pomocí lineární regresní funkce. Z provedených měření lze shrnout, že zvýšením vodivosti vzorku vrůstá rychlosti šíření zvuku ve vzorku, což vede ke zvýšení dynamického modulu. Hodnocení dynamického modulu potvrzuje výsledky získané hodnocením počátečního modulu hybridních přízí v tahu.

Závislost mezi dynamickým a počátečním modulem pružnosti je znázorněna na obrázku 6.12. Z obrázku je patrné, že dynamický modul nabývá hodnot cca o 1 řád nižších než modul statický. Mezi oběma parametry je možno pozorovat lineární závislost.



Obrázek 6.11: Závislost (a) rychlosti šíření zvukového impulsu c a (b) dynamického modulu E_{dyn} na obsahu vodivé komponenty v přízi.



Obrázek 6.12: Korelace mezi dynamickým a počátečním modulem.

6.1.4 Shrnutí

Cílem této podkapitoly bylo prozkoumat zejména elektrické chování délkových textilních útvarů s ohledem na jejich budoucí využití pro přípravu plošných textilií a výrobků odolných průchodu elektrického pole, a to proto, že dostatečně vysoká elektrická vodivost je jedním ze stěžejních požadavků pro tvorbu stínících přepážek. Cílem tedy bylo vyhledat základní komponentu textilie - vlákna, která budou splňovat požadavek jak z hlediska vodivosti, tak z hlediska dalších vlastností (geometrické, mechanické, zpracovatelské, užitné atp.).

Byly prostudovány čtyři skupiny délkových útvarů - příze nevodivé (100% CO, 100% PES), antistatické, hybridní a kovový drát. Z provedených šetření lze shrnout: příze nevodivé a příze, které obsahují vodivou komponentu spojitě po celé své délce (studované antistatické příze) vykazují lineární závislost elektrického odporu na upínací délce, což je souladu s teoretickými poznatky o závislosti elektrického odporu na vlastnostech vodiče. Z hlediska relativně vysoké hmotnostní rezistivity, resp. nízké elektrické vodivosti byly příze nevodivé a antistatické shledány jako nevhodné pro konstrukci bariérových textilií chránících proti elektromagnetickému smogu. Velikost elektrického odporu kovového drátu ($T = 14$ tex) byla velmi dobrá, díky svému vysokému průměru a s tím spojeným nepříznivým mechanickým vlastnostem je však kovový drát pro další textilní zpracování nevhodný.

Použití kovových vláken s velmi nízkým průměrem ($d < 10 \mu\text{m}$) konečné délky bylo shledáno jako perspektivní. Z hlediska materiálu byla zvolena nerezová ocel, a to zejména s ohledem na svou korozivzdornost. Odolnost vůči korozi představuje důležitý požadavek na použitý materiál díky plánované údržbě oděvů vyrobených z hybridních přízí praním. Byla navržena a vyrobena sada směsových přízí obsahujících různý obsah kovového vlákna ve struktuře příze, za účelem získání přízí s různou výší elektrické vodivosti. Jako nevodivá komponenta bylo použito staplové polypropylenové vlákno.

Sada hybridních přízí byla studována jak z hlediska elektrického chování, tak z hlediska vybraných mechanických vlastností. Bylo zjištěno a rozsáhlými experimenty potvrzeno, že v případě hybridních přízí obsahujících ve své struktuře velmi jemná kovová vlákna konečné délky je elektrický odpor R nelineární konvexně rostoucí funkcí upínací délky příze L , což je v rozporu s chováním kovů a některých kompozitních materiálů. Byl navržen jednoduchý mechanistický model založený na předpokladu přímé úměrnosti změny elektrického odporu na efektivní délce příze. Součinitel specifické rezistivity α stanovený na základě navrženého vztahu je možno využít pro porovnání přízí s odlišným obsahem vodivé komponenty a pro predikci perkolačního prahu P_0 , přičemž právě perkolační práh je hlavním faktorem určujícím vodivost daného hybridního materiálu. Jedná se o kritický obsah vodivé komponenty, při kterém se daný materiál začne chovat jako vodič, což umožňuje optimalizaci množství poměrně finančně nákladných kovových vláken pro získání dostatečně vodivé příze vhodné pro konkrétní účel použití. V průběhu řešení práce bylo potvrzeno, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty P v přízi se zvyšuje její elektrická vodivost. Byl popsán perkolační práh obsahu vodivé komponenty, který se pohybuje okolo 5 % nerezového ocelového vlákna v přízi jemnosti 25 tex.

Bylo zjištěno dále, že se zvyšujícím se zákrutem příze vzrůstá elektrická vodivost. Růst elektrické vodivosti je také možno pozorovat se zvýšením jemnosti příze.

Z hlediska provedeného mechanického hodnocení hybridních přízí lze shrnout, že obsah kovu má vliv na vybrané mechanické vlastnosti. Zvýšením obsahu kovového nerezového ocelového vlákna se snižuje jeho poměrná pevnost a tažnost, zatímco počáteční modul v tahu a dynamický modul stanovený na základě rychlosti šíření zvukového impulsu v přízi se vrůstajícím obsahem kovového vlákna v přízi stoupá.

Podařilo se docílit zvýšení elektrické vodivosti hybridních přízí při zachování ostatních vlastností kladných na příze používané v textilním průmyslu (nízká jemnost, příznivé mechanické, zpracovatelské a užitné vlastnosti). Na základě provedených šetření jak elektrických, tak mechanických vlastností byly tedy hybridní příze obsahující velmi jemná kovová vlákna shledány jako perspektivní pro konstrukci plošných textilií se zvýšenou vodivostí a předpokládanou odolností vůči elektromagnetickému smogu.

Dílič výsledky práce byly publikovány v odborných časopisech a ve sbornících mezinárodních konferencích [80, 99, 107, 111].

6.2 Plošné textilie odolné vůči průchodu elektromagnetického záření

6.2.1 Popis vzorků

Přízí se zvýšenou elektrickou vodivostí bylo využito za účelem získání plošných textilií zabraňujících průchodu elektromagnetického záření. Ve spolupráci se společností Sintex a.s. byla navržena a vyrobena široká paleta textilií (tkanin, pletenin) tvořených přízemi obsahujícími ve své struktuře kromě konvenčního polypropylenového vlákna velmi tenká kovová staplová vlákna. Směšováním klasických vláken (PP TREVON 2.2 dtex/50 mm) s extrémně jemnými vlákny kovovými (BEKINOX 9 μm / 30-50 mm) bylo docíleno zvýšení elektrické vodivosti přízí při zachování ostatních vlastností kladených na příze používané v textilním průmyslu, popř. v oděvnictví. Navržené textilie se lišily jak obsahem vodivé komponenty v použité přízi, tak různým umístěním tzv. hybridní příze v textilii, různou jemností použité příze, strukturou textilie a typem vazby. Základní parametry studovaných textilií jsou uvedeny v tabulce 6.12.

První skupinu vzorků představují tkaniny keprové vazby tvořené 100% hybridní přízí. Pro přípravu vzorků skupiny 1 byla použita příze jemnosti 50 tex obsahující 1 - 75 % nerezového ocelového vlákna. Dostava osnovy a útku byla u všech vzorků totožná - dostava útku $19.\text{cm}^{-1}$, dostava osnovy $20.\text{cm}^{-1}$. Jednotlivé vzorky v této skupině se od sebe lišily výší obsahu vodivé komponenty ve struktuře textilie (1% - 75%), viz obr. 6.13(a,b).

Druhá skupina vzorků je tvořena tkaninami keprové vazby, ve kterých je hybridní příze umístěna v osnově a útku v různých roztečích a vytváří tak tzv. vodivou mřížku. Pro přípravu vzorků skupiny 2 byla použita hybridní příze jemnosti 50 tex obsahující 5 % nerezového ocelového vlákna. Jednotlivé vzorky této skupiny se od sebe odlišovaly velikostí tzv. vodivé mřížky (3x3, 4x4, 5x5 mm), viz obr. 6.13(c,d). Jako nevodivá matrice byla u této skupiny vzorků použita 100% bavlněná příze jemnosti 50 tex. Dostava osnovy a útku byla u všech vzorků totožná - dostava útku $19.\text{cm}^{-1}$, dostava osnovy $20.\text{cm}^{-1}$.

Tkané vzorky keprové vazby obsahující tzv. vodivou mřížku o konstantní velikosti zastupují skupinu vzorků č. 3. Jednotlivé vzorky této skupiny se od sebe liší výší obsahu vodivé komponenty v přízi tvořící mřížku (1% - 20%), viz obr. 6.13(e,f). Jako nevodivá matrice je i u této skupiny vzorků použita 100% bavlněná příze. Obě použité příze mají jemnost 50 tex. Dostava osnovy a útku byla u všech vzorků totožná - dostava útku $19.\text{cm}^{-1}$, dostava osnovy $20.\text{cm}^{-1}$.

Čtvrtou skupinu vzorků tvoří vzorky hladké zátažné jednolící pleteniny vytvořené ze 100% hybridní příze. Jednotlivé vzorky v této skupině se liší výší obsahu vodivé komponenty v přízi (1% - 20%). Byla použita příze jemnosti 20 tex. Hustota řádků a sloupků byla u všech vzorků skupiny 4 totožná - hustota sloupků $12.\text{cm}^{-1}$, hustota řádků $16.\text{cm}^{-1}$. Mikroskopické snímky studovaných textilií jsou uvedeny na obr. 6.13(g,h).

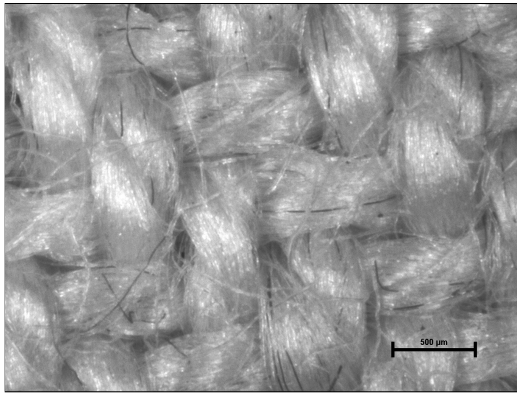
Pátou skupinu vzorků zastupují pleteniny odlišné vazby tvořené 100% hybridní příze s obsahem vodivé komponenty (nerezového ocelového vlákna) 10 %. Jedná se o vazbu zátažnou jednolící hladkou, zátažnou jednolící výplňkovou (označena jako výplněk),

zátažnou jednolící s chytovými kličkami (vzorek označený jako pique), zátažnou interlokovou pleteninou s podloženými kličkami (vzorek označený jako double face) a interlokovou pleteninou hladkou (označena jako interlok). Pro přípravu veškerých pletených vzorků byla použita příze jemnosti 25 tex. Mikroskopické snímky vzorků skupiny 5 jsou k nalezení na obr. 6.14.

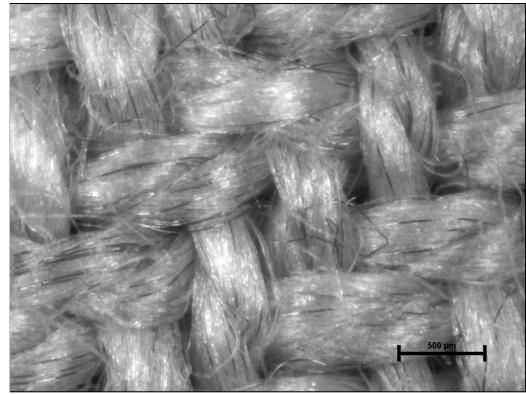
Tabulka 6.12: Parametry studovaných textilií.

Vzorek	Složení	Vazba	Umístění hybridní příže	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Tloušťka vzorku [mm]
Skupina 1	99% PP/1% SS*	Kepr 2/2	100%	233.50	0.78
	97% PP/3% SS			225.10	0.75
	95% PP/5% SS			209.02	0.77
	90% PP/10% SS			221.02	0.75
	85% PP/15% SS			217.66	0.73
	80% PP/20% SS			208.78	0.71
	60% PP/40% SS			206.46	0.70
	40% PP/60% SS			182.98	0.63
	20% PP/75% SS			159.40	0.57
Skupina 2	95% PP/5% SS+100% CO	Kepr 2/2	5x5 mm**	220.00	0.66
	95% PP/5% SS+100% CO		4x4 mm**	220.00	0.67
	95% PP/5% SS+100% CO		3x3 mm**	220.00	0.65
Skupina 3	99% PP/1% SS+100% CO	Kepr 2/2	5x5 mm**	221.98	0.83
	97% PP/3% SS+100% CO			216.22	0.83
	95% PP/5% SS+100% CO			225.34	0.83
	90% PP/10% SS+100% CO			221.26	0.83
	85% PP/15% SS+100% CO			222.70	0.83
	80% PP/20% SS+100% CO			222.94	0.83
Skupina 4	99% PP/1% SS	Jednolící pletenina	100%	157.67	0.67
	97% PP/3% SS			154.31	0.66
	99% PP/5% SS			151.91	0.64
	90% PP/10% SS			153.35	0.64
	85% PP/15% SS			149.99	0.65
	80% PP/20% SS			156.23	0.64
Skupina 5	90% PP/10% SS	Jednol. hl.	100%	149.00	0.53
		Pique		186.00	0.86
		Výplněk		168.00	0.68
		Doubleface		239.00	1.00
		Interlock		199.00	0.95

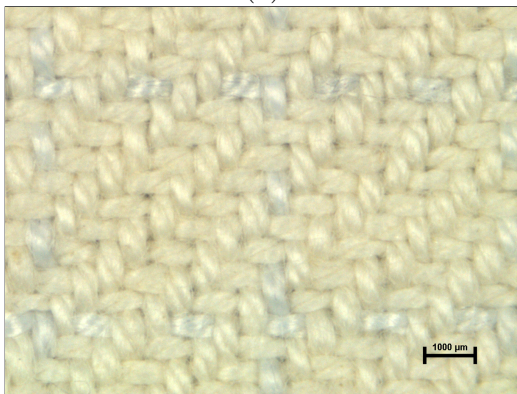
Poznámka: * SS - označení pro nerezové ocelové vlákno, ** rozteč tzv. hybridní příže v osnově a útku.



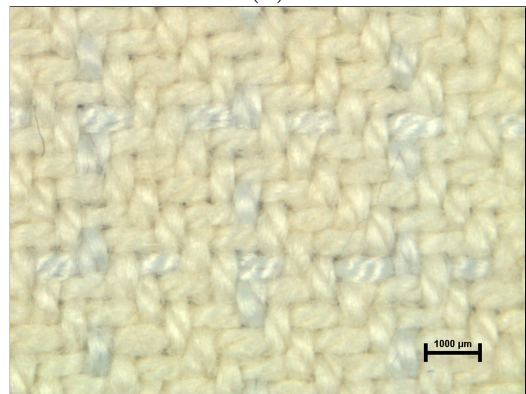
(a)



(b)



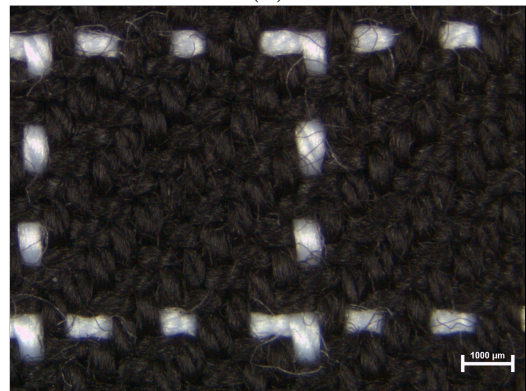
(c)



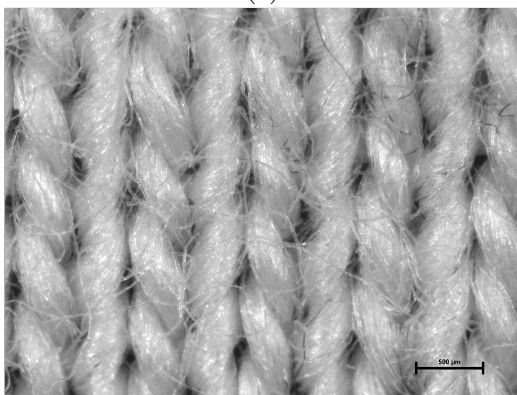
(d)



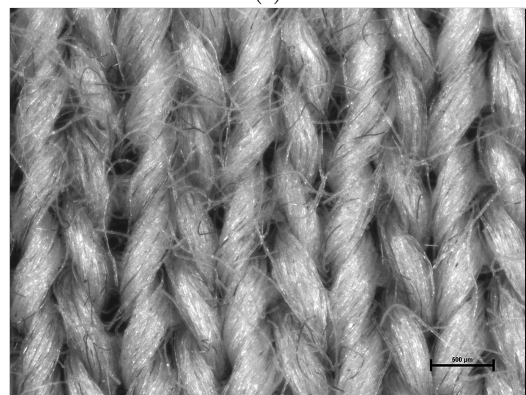
(e)



(f)

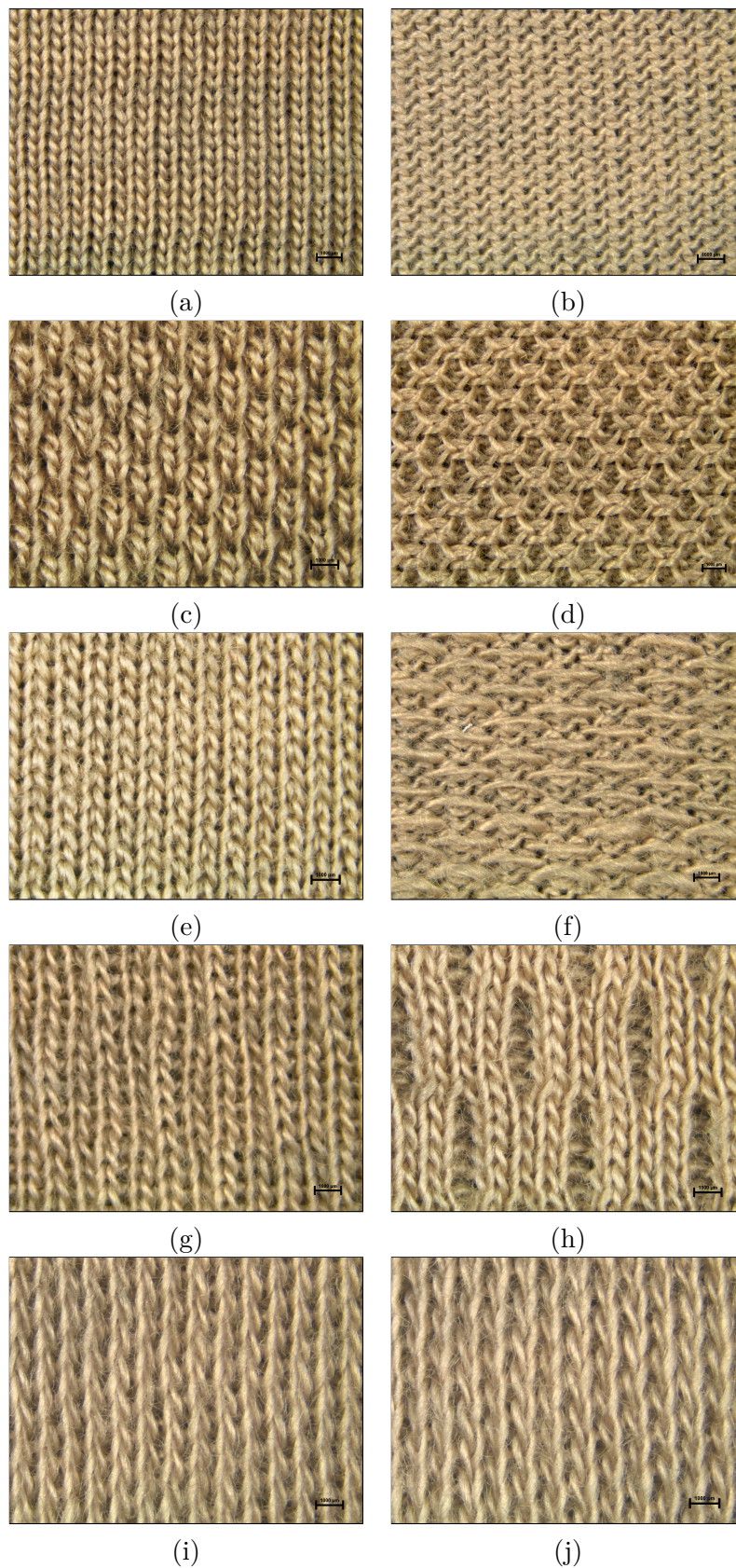


(g)



(h)

Obrázek 6.13: Mikroskopické snímky studovaných textilií: (a,b) skupina 1, obsah vodivé komponenty 5 %, resp. 20 %, (c,d) skupina 2, rozteč tzv. vodivé mřížky 5 mm, resp. 3 mm, (e,f) skupina 3 obsahující tzv. vodivou mřížku s 1 %, resp. 10 % kovu, (g,h) skupina 4 obsahující 1 %, resp. 20 % vodivé komponenty.



Obrázek 6.14: Mikroskopické snímky textilií skupiny 5: (a,b) zátažná jednolící pletenina hladká, (c,d) zátažná jednolící s chytovými kličkami - pique, (e,f) zátažná jednolící výplňková - výplněk, (g,h) zátažná interloková pletenina s podloženými kličkami - double face, (i,j) interloková pletenina hladká - interlok.

6.2.2 Studium elektrické vodivosti

Jak již bylo zmíněno, dostatečně vysoká elektrická vodivost a permeabilita materiálu je jedním z předpokladů pro konstrukci účinných bariér stínících elektromagnetické pole. Z tohoto důvodu byly plošné textilie hodnoceny z hlediska jejich elektrické vodivosti, resp. plošné a objemové rezistivity. Studován byl vliv obsahu vodivé komponenty spolu s perkolačními prahy, vliv umístění tzv. hybridní příze v textilií a vliv struktury na výsledné elektrické vlastnosti.

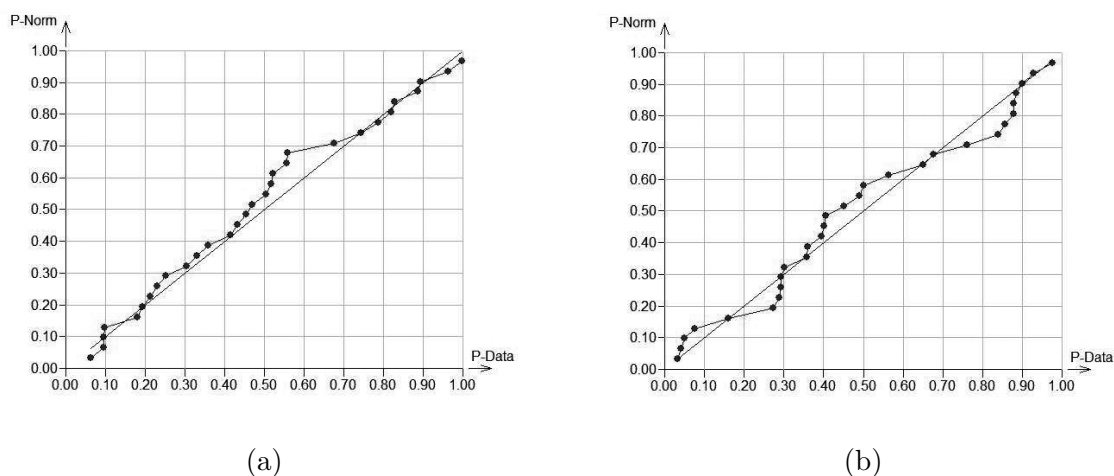
Hodnocení elektrické vodivosti

Pro hodnocení elektrické vodivosti plošných textilií byly zvoleny dva parametry, a to povrchová a objemová rezistivita. Tyto parametry je možno stanovit ze znalosti hodnot povrchového a objemového odporu, příslušných rozměrů měřících elektrod, případně tloušťky vzorku.

Pro měření povrchového a objemového odporu textilních materiálů byla použita měřící soustava obsahující koncentrický elektrodový systém odpovídající normě ČSN EN 1149-1, EN 100015, ČSN EN 61340-5-1 a měřicí přístroj. Měření elektrického odporu bylo provedeno při klimatických podmínkách $T_P = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$, $\varphi = (40 \pm 2)\%$, což je v souladu s normou ČSN 80 0059. Testovací napětí $U = 10\text{ V}$ bylo použito pro hodnoty elektrického odporu do $10^5\ \Omega$ a $U = 100\text{ V}$ pro vyšší odpory (ČSN EN 61340-5-2). Více informací vč. tvaru a uskupení elektrod při měření povrchového a objemového odporu a vztahy pro stanovení povrchové a objemové rezistivity nalezne čtenář v kapitole 5.3.3. Objemový i plošný odpor byl měřen vždy minimálně na 30ti odlišných místech každého vzorku textilie.

Statistické vyhodnocení naměřených dat

S využitím testu kombinace výběrové šikmosti a špičatosti bylo ověřeno, že naměřená data objemového a povrchového odporu pochází z normálního rozdělení. Pro grafické porovnání výběrového rozdělení s teoretickým normálním rozdělením byl zvolen pravděpodobnostní graf, viz obr. 6.15. Lineární P-P graf s jednotkovou směrnici a nulovým úsekem ukazuje na shodu výběrového rozdělení s normálním rozdělením. Pro další interpretaci výsledků byl pro odhad střední hodnoty zvolen aritmetický průměr a 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty.



Obrázek 6.15: Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením (a) povrchového odporu, (b) objemového odporu s normálním rozdělením.

V tabulce 6.13 jsou uvedeny průměrné hodnoty povrchové a objemové rezistivity spolu s intervaly spolehlivosti pro skupinu vzorků č. 1, kterou tvoří tkaniny keprové vazby vyrobené ze 100% hybridní příze s různým obsahem kovového staplového vlákna (1-75%). V tabulce 6.14 jsou shromážděny průměrné hodnoty povrchové a objemové rezistivity spolu s intervaly spolehlivosti skupiny vzorků č. 2, kterou tvoří tkaniny keprové vazby vytvořené 100% bavlněnou matricí, ve které je vytkaná za pomoci hybridní příze s konstantním obsahem vodivé komponenty (5 % SS) tzv. vodivá mřížka. Velikost tzv. vodivé mřížky je řízena roztečí hybridních přízí v osnově a útku (5x5, 4x4, 3x3 mm). V tabulce 6.15 jsou zobrazeny průměrné hodnoty povrchové a objemové rezistivity spolu s intervaly spolehlivosti vzorků skupiny č. 3, kterou zastupují tkaniny keprové vazby vyrobené ze 100% bavlněné příze. Ve struktuře vzorků je hybridní přízí vytkaná vodivá mřížka. V tomto případě má mřížka konstantní velikost (5x5 mm). Vzorky ve skupině č. 3 se od sebe liší použitím hybridních přízí s různým obsahem vodivé komponenty (1 - 20%). V tabulce 6.16 jsou zobrazeny průměrné hodnoty povrchové a objemové rezistivity spolu s intervaly spolehlivosti vzorků skupiny č. 4, kterou představují jedolící pleteniny tvořené 100% hybridní příze lišící se obsahem nerezového ocelového vlákna.

Tabulka 6.13: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity tkaných vzorků skupiny č. 1.

Označení	Složení	Povrchová rezistivita ρ_s [Ω]		Objemová rezistivita ρ_v [$\Omega.cm$]	
		\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
T1	99%PP/1%SS	3.61E+07	$\pm 2.37E+07$	1.42E+07	$\pm 8.41E+06$
T3	97%PP/3%SS	7.81E+06	$\pm 3.86E+06$	7.34E+06	$\pm 4.16E+06$
T5	95%PP/5%SS	3.97E+05	$\pm 1.77E+05$	2.84E+05	$\pm 1.36E+05$
T10	90%PP/10%SS	3.61E+04	$\pm 6.25E+03$	7.75E+04	$\pm 1.37E+04$
T15	85%PP/15%SS	6.91E+03	$\pm 1.84E+03$	3.64E+04	$\pm 8.48E+03$
T20	80%PP/20%SS	1.87E+03	$\pm 4.18E+02$	1.79E+04	$\pm 2.50E+03$
T40	60%PP/40%SS	1.20E+02	$\pm 3.06E+01$	5.47E+03	$\pm 1.49E+03$
T60	40%PP/60%SS	5.00E+01	$\pm 2.69E+00$	1.56E+03	$\pm 8.29E+01$
T75	25%PP/75%SS	3.82E+01	$\pm 3.37E+00$	1.51E+03	$\pm 1.04E+02$

Tabulka 6.14: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity tkaných vzorků skupiny č. 2.

Označení	Rozteč hybridní příze [mm]	Povrchová rezistivita ρ_s [Ω]		Objemová rezistivita ρ_v [$\Omega.cm$]	
		\bar{x}	95%IS	\bar{x}	95%IS
K5-3	3	4.68E+04	$\pm 1.34E+04$	8.28E+04	$\pm 1.02E+04$
K5-4	4	1.24E+05	$\pm 1.92E+04$	1.11E+05	$\pm 1.52E+04$
K5-5	5	1.87E+05	$\pm 2.14E+04$	1.56E+05	$\pm 2.23E+04$

Tabulka 6.15: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity tkaných vzorků skupiny č. 3.

Označení	Složení hybridní příze	Povrchová rezistivita ρ_s [Ω]		Objemová rezistivita ρ_v [$\Omega \cdot \text{cm}$]	
		\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
K1-5	99 % PP/1% SS	3.91E+13	$\pm 3.64\text{E}+12$	4.54E+11	$\pm 2.98\text{E}+11$
K3-5	97%PP/3%SS	1.97E+11	$\pm 1.74\text{E}+11$	8.90E+08	$\pm 1.09\text{E}+09$
K5-5	95%PP/5%SS	1.71E+07	$\pm 6.17\text{E}+06$	7.69E+07	$\pm 5.76\text{E}+07$
K10-5	90%PP/10%SS	1.26E+06	$\pm 2.55\text{E}+05$	8.47E+06	$\pm 4.51\text{E}+06$
K15-5	85%PP/15%SS	5.85E+05	$\pm 1.41\text{E}+05$	2.21E+06	$\pm 1.27\text{E}+06$
K20-5	80%PP/20%SS	1.62E+05	$\pm 5.35\text{E}+04$	1.54E+06	$\pm 1.05\text{E}+06$

Tabulka 6.16: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity tkaných vzorků skupiny č. 4.

Označení	Složení	Povrchová rezistivita ρ_s [Ω]		Objemová rezistivita ρ_v [$\Omega \cdot \text{cm}$]	
		\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
P1	99%PP/1%SS	7.72E+14	$\pm 3.14\text{E}+14$	4.22E+06	$\pm 1.70\text{E}+06$
P3	97%PP/3%SS	2.10E+14	$\pm 7.94\text{E}+14$	2.72E+06	$\pm 1.10\text{E}+06$
P5	95%PP/5%SS	1.50E+09	$\pm 1.12\text{E}+09$	3.29E+05	$\pm 1.02\text{E}+05$
P10	90%PP/10%SS	1.15E+07	$\pm 1.92\text{E}+06$	1.58E+05	$\pm 2.80\text{E}+04$
P15	85%PP/15%SS	9.93E+06	$\pm 2.62\text{E}+06$	7.33E+04	$\pm 1.09\text{E}+04$
P20	80%PP/20%SS	2.79E+06	$\pm 3.06\text{E}+05$	7.06E+04	$\pm 1.86\text{E}+04$

Vliv obsahu vodivé komponenty

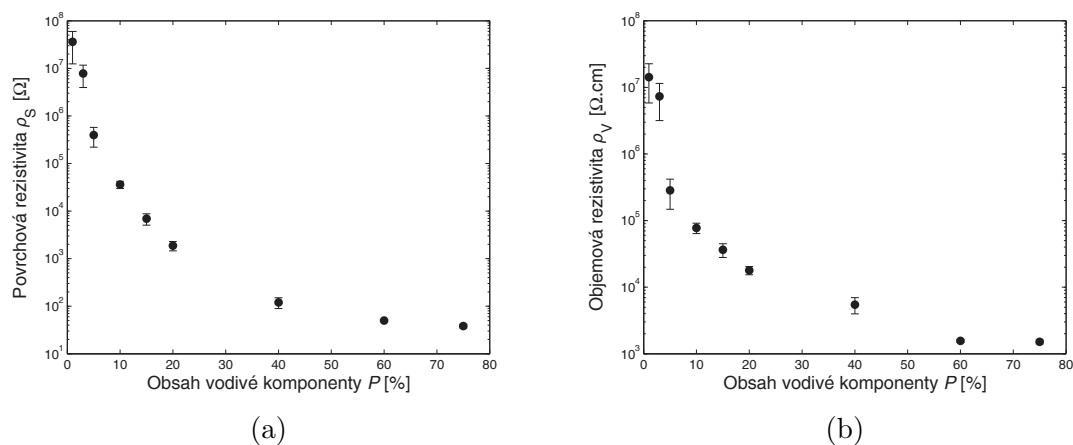
Na obrázku 6.16 je zobrazena závislost povrchové a objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty ve vzorku pro skupinu vzorků č. 1. Z obrázku je zřejmé, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty P v textilií se zvyšuje její elektrická vodivost, resp. klesá rezistivita. Při zvýšení obsahu kovového vlákna z 1 % na 10 %, dochází k poklesu obou rezistivit o 3 řády. Zvýšení obsahu vodivé komponenty z 1 % na 75 % zapříčiní pokles rezistivit o 6 řádů, resp. 4 řády pro povrchovou, resp. objemovou rezistivitu. Perkolační práh obsahu vodivé komponenty je možné pozorovat v oblasti kolem 3-5 %. Je zřejmé, že při zvyšování koncentrace vodivé komponenty nad 60 % již nedochází k výraznému poklesu rezistivit.

Závislost objemové i povrchové rezistivity na obsahu vodivé komponenty nad perkolačním prahem je možno aproximovat pomocí mocninné funkce v souladu se vztahy uvedenými v práci CLINGERMANNA [14]

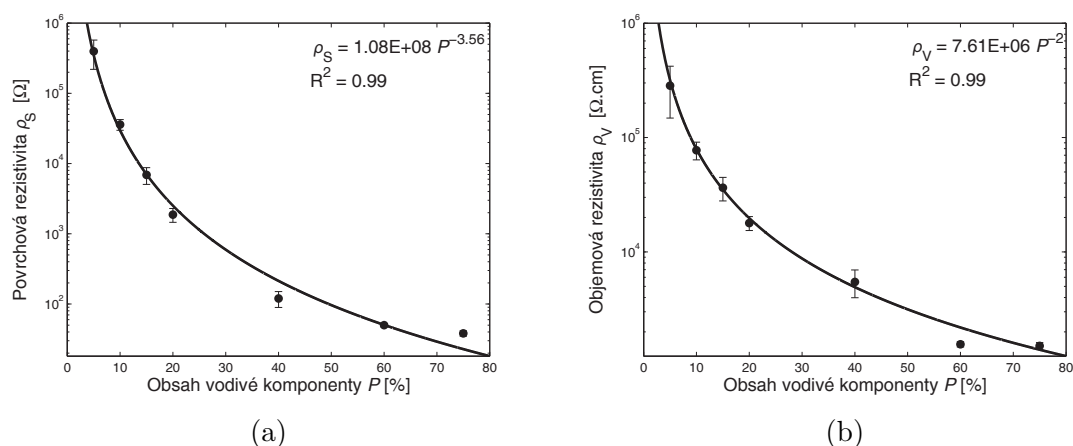
$$\rho_v = \rho_{CV} P^E \quad (6.11)$$

$$\rho_s = \rho_{CS} P^E \quad (6.12)$$

kde ρ_{CV} , resp. ρ_{CS} je objemová rezistivita, resp. povrchová rezistivita pro $P = 1$ % vodivé komponenty v přízi, P je obsah nerezového ocelového vlákna a parametr E je závislý na struktuře vodivé komponenty (viz obr. 6.17).



Obrázek 6.16: Závislost (a) plošné rezistivity a (b) objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi pro skupinu vzorků č. 1.



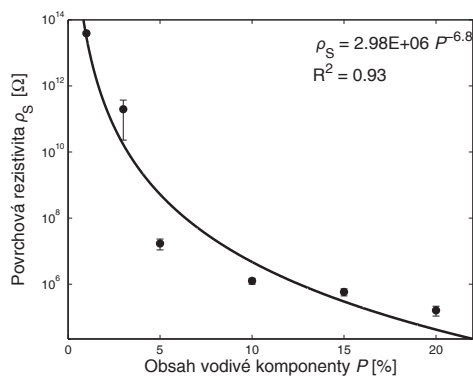
Obrázek 6.17: Závislost (a) plošné rezistivity, (b) objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi v oblasti nad perkolačním prahem pro skupinu vzorků č. 1 proložená mocninovou funkcí.

Obdobné chování elektrické vodivosti v závislosti na obsahu vodivé komponenty v přízi bylo také pozorováno u vzorků obsahujících ve své struktuře tzv. vodivou mřížku a u pletených vzorků (skupina vzorků č. 3 a 4 v tabulce 6.12), viz obr. 6.18.

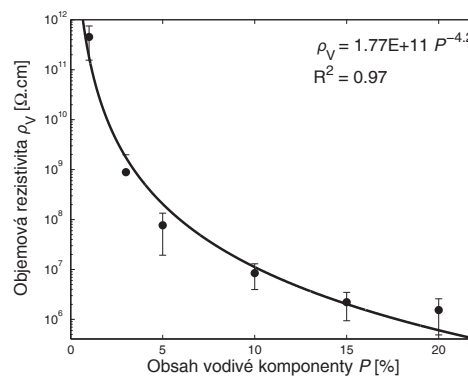
Pletené vzorky dosahují nižší vodivosti, resp. vyšší rezistivity v porovnání se vzorky tkanými. Tento jev je způsoben použitím jemnějších přízí v případě pletenin, jejich otevřenější strukturou, což se projeví i na plošné hmotnosti (plošná hmotnost studovaných pletenin je cca o 20 % nižší než tkanin) a celkově nižším obsahu vodivé komponenty na jednotku plochy i objemu pletených vzorků.

Vliv velikosti vodivé mřížky

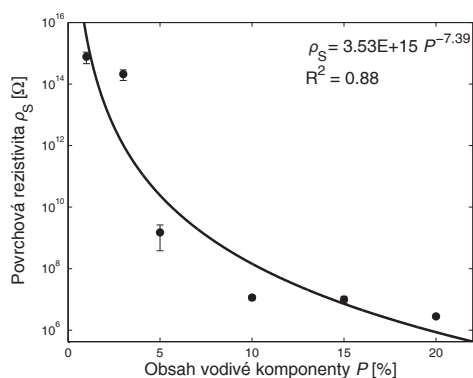
Na obr. 6.19 je zobrazena závislost povrchové a objemové rezistivity na rozteči hybridní příze v osnově a útku pro skupinu vzorků č. 2. Tuto skupinu zastupují tkaniny keprové vazby tvořené 100% bavlněnou maticí, ve které je za pomoci hybridní příze s konstantním obsahem kovového vlákna vytkaná tzv. vodivá mřížka. Velkost mřížky je řízena různou roztečí hybridní příze v osnově a útku. Rozteč hybridní příze v osnově a útku je u jednotlivých vzorků totožná, hybridní příze tedy tvoří tzn. vodivou mřížku čtvercového tvaru.



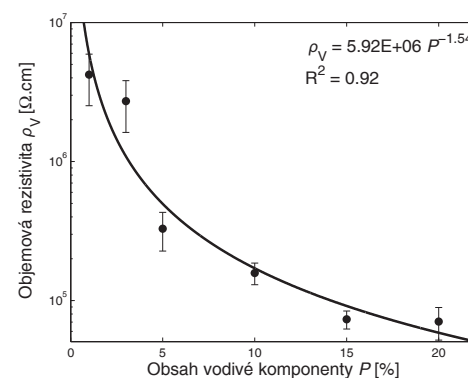
(a)



(b)



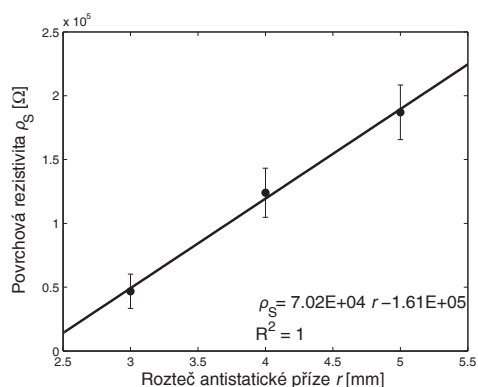
(c)



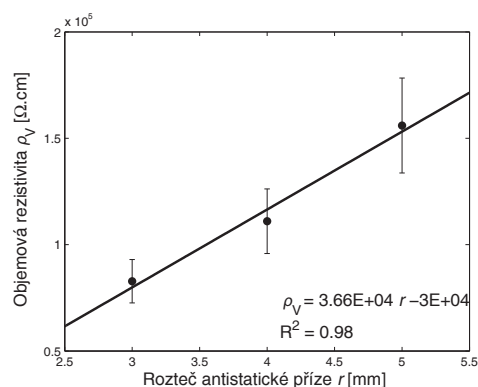
(d)

Obrázek 6.18: Závislost (a) plošné rezistivity, (b) objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi pro skupinu vzorků č. 2, (c) plošné rezistivity, (d) objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi pro skupinu vzorků č. 4.

Z obrázku je zřejmé, že se snižující se roztečí hybridní příze v osnově a útku se snižuje jak povrchová, tak objemová rezistivita. Tento jev je způsoben tím, že při snížení rozteče hybridní příze v osnově a útku vzniká mřížka s menší velikostí oka, a tím textilie získává vyšší obsah vodivé komponenty na jednotku plochy i objemu. Závislost obou rezistivit na rozteči antistatické příze v osnově i útku je možno aproximovat pomocí lineární regresní přímky.



(a)



(b)

Obrázek 6.19: Závislost (a) plošné rezistivity, (b) objemové rezistivity na rozteči hybridní příze tvořící tzv. vodivou mřížku ve skupině vzorků č. 2.

6.2.3 Studium účinnosti elektromagnetického stínění

Veškeré vyvinuté hybridní textilie byly studovány také z hlediska jejich schopnosti bránit průchodu elektromagnetického pole, tzn. velikosti účinnosti elektromagnetického stínění. Jak je uvedeno v kapitole 4.4, v současné době se používá různých přístupů měření účinnosti elektromagnetického stínění. Na počátku řešení této práce bylo využíváno zejména vlnovodného měřicího přístupu, který byl pro účely hodnocení vodivých textilií navržen a zkonstruován v rámci řešení předložené disertační práce, a to proto, že na Technické univerzitě v Liberci nebylo v té době dostupné žádné zařízení vhodné pro hodnocení elektromagneticko-stínících charakteristik planárních útvarů. Velkou nevýhodou této metody však je, že pro velmi úzké frekvenční pásmo je třeba použití vlnovodu specifických rozměrů, a z toho vyplývá nemožnost hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti vzorků v širší frekvenční oblasti, což je limitující. O navrženém měřícím principu a jeho verifikaci bude podrobněji pojednáno v kapitole 6.3.

V průběhu řešení práce se podařilo na Fakultě textilní TUL vybavit specializované měřicí pracoviště dle americké normy ASTM D4935, která popisuje měření elektromagnetické stínící účinnosti pomocí techniky koaxiálního vedení. Výhodou této měřicí metody je možnost zaznamenávání elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na širokém frekvenčním pásmu. V této podkapitole proto budou prezentovány výsledky získané pomocí přerušného koaxiálního vedení dle ASTM D4935, a to zejména kvůli možnosti průzkumu elektromagnetické stínící účinnosti vyvinutých textilií (tkanin, pletenin) při různých frekvencích.

Hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti

Efektivita stínění (SE) textilií byla hodnocena dle normy ASTM 4935-99, která je určena pro hodnocení plošných materiálů. Tato norma pracuje s předpokladem dopadu rovinné vlny na stínící přepážku v blízké zóně elektromagnetického pole pro frekvenci 30 MHz až 1.5 GHz. Měřicí přípravek sestával z držáku vzorku koaxiálního tvaru (výrobce Electro-Metrics, Inc., model EM-2107A), jehož vstup a výstup byl připojen k obvodovému analyzátoru. Pro generování a přijímání elektromagnetického signálu byl použit obvodový analyzátor Rhode & Schwarz ZNC3. Pro kalibraci měřicí soustavy se využívá referenční vzorek měřeného materiálu ve tvaru mezikružít. Měřený vzorek má tvar kruhu. Referenční a měřený vzorek musí být stejného materiálu a tloušťky. Přesné geometrické rozměry vzorku (referenčního i měřeného) jsou popsány v kapitole 5.3.3. Efektivita elektromagnetického stínění byla měřena vždy minimálně na 5 odlišných místech každého vzorku textilie.

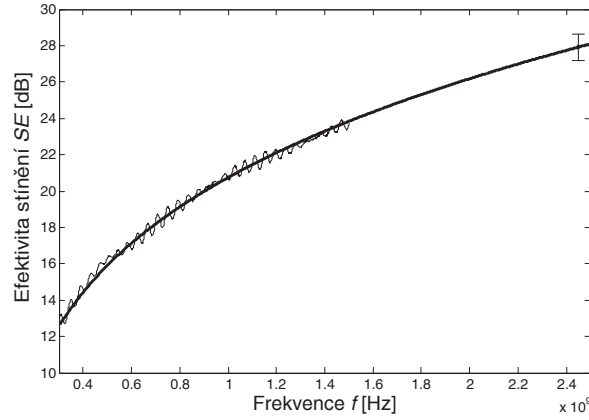
Na obrázku 6.20 jsou zobrazeny výsledky měření stínící účinnosti (SE), a tedy závislost SE na frekvenci získaná přímým měřením. Za účelem eliminace stojatých vln byla získaná data aproximována pomocí zobecněné logaritmické funkce převzaté z [43]

$$SE(f) = a + b \log(f) + c\sqrt{f}, \quad (6.13)$$

kde a , b , c jsou konstanty závislé na charakteristické impedanci materiálu stínící přepážky a charakteristické impedanci média obklopujícího stínící přepážku, f je frekvence. Tato funkce má fyzikální význam a velmi dobře vystihuje trend pozorované řady. Parametry modelu byly odhadnuty pomocí metody nejmenších čtverců.

Pro zjištění předpokládané stínící účinnosti při dalších frekvencích dopadající elek-

elektromagnetické vlny mimo frekvenční pásmo přímo měřené (např. $f = 2.45$ GHz, tj. frekvence mikrovlnných trub), bylo využito extrapolace spolu s výpočtem intervalové předpovědi na hladině $\alpha = 0.05$, viz obecná grafická interpretace na obr. 6.20.



Obrázek 6.20: Závislost účinnosti stínění elektromagnetického pole na frekvenci aproximovaná zobecněnou logaritmickou funkcí spolu s predikcí SE pro $f = 2.5$ GHz.

Statistické vyhodnocení naměřených dat

Z důvodu relativně nízkého počtu měření byla pro další statistické vyhodnocení využita analýza malých výběrů. Pro $4 \leq n \leq 20$ navrhuje HORN [74] postup založený na pořádkových statistikách. Vychází se z pivotů odpovídajících přibližně výběrovým kvartilům. Hloubka pivotu je $h = \text{int}((n+1)/2)$, nebo $h = \text{int}(((n+1)/2) + 1)/2$ podle toho, které číslo bude číslem celým. Dolní pivot je $x_D = x_{(h)}$ a horní pivot $x_H = x_{(n+1-h)}$. Odhadem parametru polohy je *pivotová polosuma*

$$P_L = \frac{x_D + x_H}{2} \quad (6.14)$$

a odhadem parametru rozptýlení *pivotové rozpětí*

$$R_P = x_H - x_D. \quad (6.15)$$

95% interval spolehlivosti střední hodnoty může být pomocí pivotových statistik uvedených v [74] vyjádřen jako

$$P_L - R_P t_{L,0.95}(n) \leq \mu \leq P_L + R_P t_{L,0.95}(n). \quad (6.16)$$

Tabulka kvantilů $t_{L,1-\alpha}(n)$ rozdělení T_L je uvedena v [74]. Tento postup umožňuje rychlé určení robustních odhadů polohy a rozptýlení parametrů u velmi malých výběrů.

V tabulce 6.17 jsou uvedeny pivotové polosumy efektivity elektromagnetického stínění spolu s intervaly spolehlivosti pro skupinu vzorků č. 1, kterou tvoří tkaniny keprové vazby vyrobené ze 100% hybridní příze s různým obsahem kovového staplového vlákna (1-75%).

Jedním z dílčích cílů práce bylo prozkoumat vliv počtu vrstev na výslednou stínící účinnost celého systému tvořeného různým počtem vrstev materiálu. Pro tento účel byl vybrán vzorek T1, tj. tkanina obsahující 1 % kovového vlákna ze skupiny vzorků č. 1. Tkanina byla vrstvena a proměřen byl tzv. sendvič obsahující 1 až 5 vrstev vzorku

označeného T1. V tabulce 6.18 jsou shromážděny pivotové polosumy efektivity stínění spolu s intervaly spolehlivosti pro sendvič tvořený různým počtem vrstev.

V tabulce 6.19 jsou shromážděny pivotové polosumy elektromagnetické stínící účinnosti spolu s intervaly spolehlivosti skupiny vzorků č. 2, kterou tvoří tkaniny keprové vazby vytvořené 100% bavlněnou maticí, ve které je vytkaná za pomoci hybridní příze s konstantním obsahem vodivé komponenty (5 % SS) tzv. vodivá mřížka. Velikost tzv. vodivé mřížky je řízena roztečí hybridních přízí v osnově a útku (5x5, 4x4, 3x3 mm).

V tabulce 6.20 jsou zobrazeny pivotové polosumy stínící účinnosti spolu s intervaly spolehlivosti vzorků skupiny č. 3, kterou zastupují tkaniny keprové vazby vyrobené ze 100% bavlněné příze. Ve struktuře vzorků je hybridní přízí vytkaná tzv. vodivá mřížka. V tomto případě má mřížka konstantní velikost (5x5 mm). Vzorky ve skupině č. 3 se od sebe liší použitím hybridních přízí s různým obsahem vodivé komponenty (1 - 20%). U všech vzorků jsou v tabulkách zobrazeny hodnoty efektivity stínění pro vybrané frekvence, a to 600 MHz a 1.5 GHz a 2.45 GHz.

V tabulce 6.21 jsou zobrazeny pivotové polosumy elektromagnetické stínící účinnosti spolu s intervaly spolehlivosti vzorků skupiny č. 4, kterou představují jedolící pleteniny tvořené 100% hybridní příze lišící se obsahem nerezového ocelového vlákna. Získaná závislost efektivity stínění elektromagnetického pole na frekvenci pletených vzorků je značně odlišná od vzorků tkaných, aproximace dat pomocí logaritmické funkce v tomto případě není vhodná. Vzhledem ke složitosti a omezeným znalostem systému pletených vzorků není možné specifikovat třídu vhodného parametrického modelu. Za účelem požadavku nalezení „vyhlazených“ funkčních hodnot pro další vyhodnocení bylo zvoleno využití tzv. neparametrických modelů, a to spline vyhlazování. Vyhlažovací parametr p je měřítkem mezi hladkostí a stupněm přiblížení modelu k experimentálním hodnotám. Pro tento systém $p \rightarrow 0$, model pak prokládá data se zvolenou chybou a přitom není zbytečně „zvlněný“. U vzorků pletených jsou zobrazeny hodnoty účinnosti elektromagnetického stínění pro vybrané frekvence ležící uvnitř měřeného frekvenčního pásma (600 MHz, 1 GHz, 1.5 GHz). Použití extrapolace pro získání predikce stínící účinnosti vně měřené frekvenční pásma není v případě použité neparametrické funkce vhodné.

V tabulce 6.27 jsou zobrazeny pivotové polosumy efektivity elektromagnetického stínění spolu s intervaly spolehlivosti vzorků skupiny č. 5, kterou představují pleteniny různé vazby tvořené 100% hybridní příze s obsahem nerez ocelového ocelového vlákna 10 %. Potvrdilo se, že tvar závislosti efektivity stínění elektromagnetického pole na frekvenci pletených vzorků je značně odlišná od vzorků tkaných, i v tomto případě bylo využito kubické spline vyhlazování.

Tabulka 6.17: Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 1.

Označení	Složení	Efektivita elektromagnetického stínění <i>SE</i> [dB]					
		<i>f</i> =600 MHz		<i>f</i> =1.5 GHz		<i>f</i> =2.45 GHz	
		<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS
T1	99%PP/1%SS	7.19	±0.42	13.16	±0.86	17.82	±0.76
T3	97%PP/3%SS	14.04	±0.62	20.36	±0.62	24.34	±0.97
T5	95%PP/5%SS	17.11	±0.71	23.83	±0.64	27.91	±0.73
T10	90%PP/10%SS	23.16	±0.48	28.89	±0.32	31.79	±0.63
T15	85%PP/15%SS	27.41	±0.14	32.47	±0.33	34.70	±0.59
T20	80%PP/20%SS	30.04	±0.44	34.59	±0.33	36.43	±0.67
T40	60%PP/40%SS	38.99	±0.49	41.99	±0.40	43.12	±0.97
T60	40%PP/60%SS	41.95	±0.26	45.14	±0.20	46.42	±1.15
T75	25%PP/75%SS	45.90	±0.25	50.50	±0.62	53.36	±1.37

Tabulka 6.18: Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE tzv. sendviče tvořeného vrstvami vzorku T1.

Označení	Počet vrstev	Efektivita elektromagnetického stínění <i>SE</i> [dB]					
		<i>f</i> =600 MHz		<i>f</i> =1.5 GHz		<i>f</i> =2.45 GHz	
		<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS
T1x1	1	7.19	±0.42	13.16	±0.86	17.82	±0.76
T1x2	2	12.98	±0.39	17.22	±0.32	19.07	±0.62
T1x3	3	18.73	±0.66	22.39	±0.21	23.60	±0.52
T1x4	4	24.83	±0.84	26.91	±0.56	26.19	±0.59
T1x5	5	29.66	±0.69	30.66	±0.80	28.69	±0.75

Tabulka 6.19: Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 2.

Označení	Rozteč hybridní příze [mm]	Efektivita elektromagnetického stínění <i>SE</i> [dB]					
		<i>f</i> =600 MHz		<i>f</i> =1.5 GHz		<i>f</i> =2.45 GHz	
		<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS
K5-3	3	3.32	±0.60	8.21	±0.74	12.58	±0.39
K5-4	4	4.33	±0.41	9.91	±0.62	14.61	±0.43
K5-5	5	5.40	±0.44	11.63	±0.35	16.56	±0.39

Tabulka 6.20: Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 3.

Označení	Složení hybridní příže	Efektivita elektromagnetického stínění <i>SE</i> [dB]					
		<i>f</i> =600 MHz		<i>f</i> =1.5 GHz		<i>f</i> =2.45 GHz	
		<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS
K1-5	99%PP/1%SS	0.28	±0.20	1.33	±0.51	2.14	±0.12
K3-5	97%PP/3%SS	1.62	±0.41	4.29	±0.24	5.67	±0.23
K5-5	95%PP/5%SS	3.16	±1.02	6.84	±1.07	8.01	±0.30
K10-5	90%PP/10%SS	5.10	±0.41	9.75	±0.98	11.06	±0.33
K15-5	85%PP/15%SS	7.82	±0.37	12.63	±0.79	13.34	±0.39
K20-5	80%PP/20%SS	11.00	±0.18	14.42	±0.93	14.13	±0.41

Tabulka 6.21: Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 4.

Označení	Složení	Efektivita elektromagnetického stínění <i>SE</i> [dB]					
		<i>f</i> =600 MHz		<i>f</i> =1 GHz		<i>f</i> =1.5 GHz	
		<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS
P1	99%PP/1%SS	0.34	±0.05	0.36	±0.06	0.40	±0.12
P3	97%PP/3%SS	0.31	±0.03	0.48	±0.11	0.76	±0.26
P5	95%PP/5%SS	0.44	±0.12	1.12	±0.32	2.33	±0.73
P10	90%PP/10%SS	1.42	±0.35	3.89	±0.65	7.63	±0.90
P15	85%PP/15%SS	4.29	±1.33	9.54	±1.10	9.69	±0.35
P20	80%PP/20%SS	4.64	±0.65	9.99	±0.95	9.51	±0.36

Tabulka 6.22: Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 5.

Označení	Vazba	Efektivita elektromagnetického stínění <i>SE</i> [dB]					
		<i>f</i> =600 MHz		<i>f</i> =1 GHz		<i>f</i> =1.5 GHz	
		<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS	<i>P_L</i>	95% IS
JC	jednolic. hl.	1.42	±0.35	3.89	±0.65	7.64	±0.90
DTC	doubleface	10.57	±0.39	13.43	±0.58	8.26	±0.63
IMC	interlock	0.29	±0.12	0.62	±0.03	1.04	±0.07
PC	pique	7.76	±0.56	13.64	±0.94	9.63	±1.37
VC	výplněk	15.54	±0.71	13.08	±1.04	8.53	±0.59

Frekvenční závislost efektivity elektromagnetického stínění

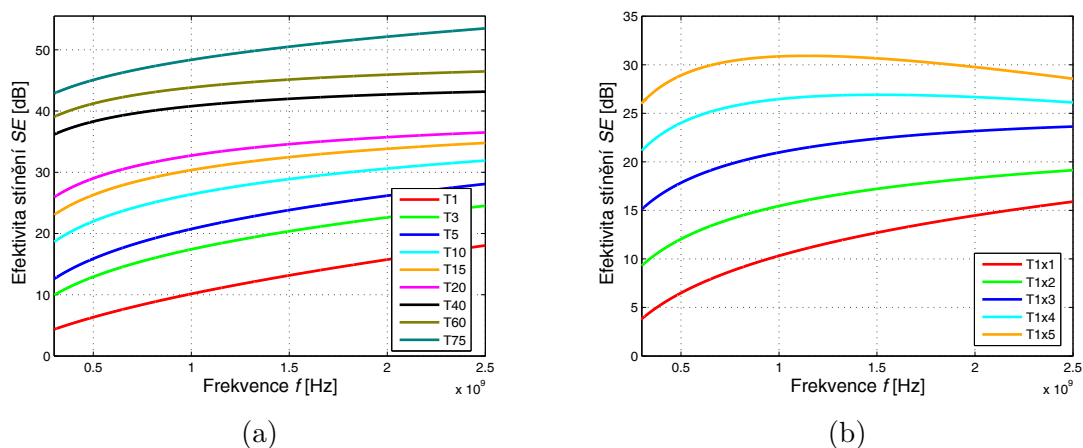
Na obrázku 6.21 a 6.22 je zobrazena závislost účinnosti elektromagnetického stínění na frekvenčním pásmu 30 MHz až 2.5 GHz pro veškeré sady studovaných vzorků. Konkrétně se jedná o skupinu č. 1 (obr. 6.22(a)), kterou zastupují tkaniny keprové vazby vyrobené hybridními přízemi obsahujícími různý obsah vodivého kovového vlákna. Na obr. 6.22(b) je zobrazena frekvenční závislost tzv. sendvičů vytvořených vrstvením vzorku T1. Na obrázku 6.22(c) je zobrazena frekvenční závislost vzorků skupiny č. 2, tj. vzorků obsahujících tzv. vodivou mřížku různé velikosti. Na obrázku 6.22(d) je

zobrazena závislost SE na frekvenci pro vzorky skupiny č. 3, kterou zastupují tkaniny s vytkanou vodivou mřížkou o konstantní velikosti a různé vodivosti. Mřížka je vytvořena hybridní přízí s odlišným obsahem vodivé komponenty. Obrázek 6.22(e,f) předvádí frekvenční závislost vzorků skupiny č. 4 a 5. V případě skupiny č. 4 se jedná o pleteniny obsahující odlišný obsah vodivého vlákna v přízi. Skupina č. 5 zahrnuje pleteniny s totožným obsahem vodivé komponenty avšak odlišné struktury, tedy vazby.

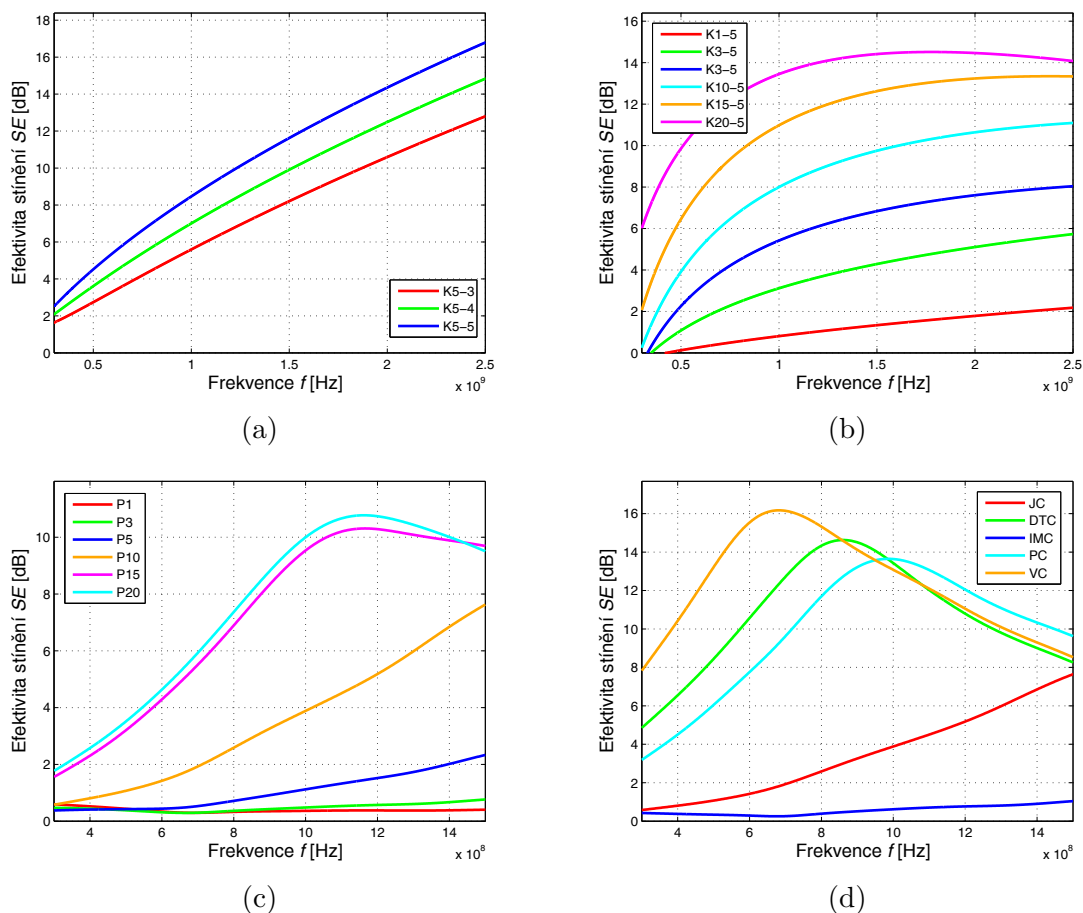
Z předvedených frekvenčních závislostí efektivity elektromagnetického stínění studovaných textilních vzorků je zřejmé, že efektivita stínění je funkcí rostoucí, a to zejména ve frekvenční oblasti do 1 GHz. Z obrázků lze pozorovat, že vzorek s nejvyšším obsahem vodivé komponenty (kovového vlákna) dosahuje nejvyšší stínící účinnosti v celém frekvenčním pásmu (více jak 50 dB pro frekvenci elektromagnetického záření nad 1.5 GHz). Potvrzen byl předpoklad, že efektivita elektromagnetického stínění vzrůstá s rostoucím obsahem vodivé složky ve vzorku.

Z grafického vyobrazení vyplývá, že nejvyšší stínící účinnosti dosahují vzorky skupiny č. 1, tedy vzorky, které jsou tvořeny 100 % hybridní příze. Bylo zjištěno, že uspokojivé stínící účinnosti je možno dosáhnout při použití tzv. vodivé mřížky, což výrazně snižuje výrobní náklady výrobku. Extrémně jemné nerezové ocelové vlákno obchodního označení Bekinox je až 100x dražší (při porovnání ceny v EUR/kg) než např. vlákno bavlněné. Optimalizace obsahu vodivé složky v přízi/plošné textilií je nutná nejen kvůli finanční nákladnosti použitého materiálu, ale také s ohledem na opotřebení strojního zařízení. Bylo zjištěno, že zpracování přízí obsahujících více jak 40 % kovového vlákna způsobuje vysoké opotřebení jednotlivých kovových součástí strojů, které jsou v kontaktu se zpracovávanou přízí a mimo jiné krátkou životnost frekvenčních měničů doprůvadacích strojů způsobenou migrací kovových vláken.

Viditelná je výrazně nižší bariérní schopnost pletenin v porovnání s tkanými vzorky. Tento jev je způsoben jednak použitím jemnější příze (tkaniny: příze 50 tex, pleteniny: příze 25 tex), dále otevřenější strukturou (vyšší pórozitou) pleteniny v porovnání se studovanými tkaninami. Bylo zjištěno, že modifikací struktury pleteniny, tedy vazby lze dosáhnout vyšší stínící schopnosti textilního materiálu.



Obrázek 6.21: Frekvenční závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků (a) skupiny č. 1, (b) vícevrstevných.



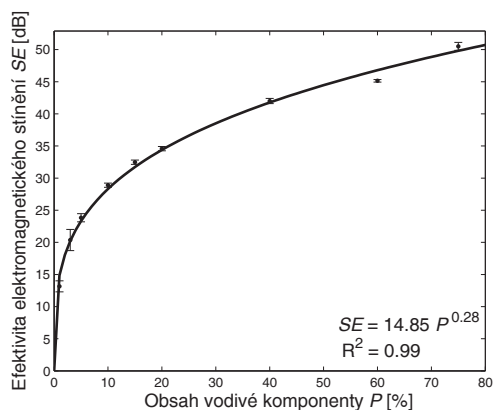
Obrázek 6.22: Frekvenční závislost SE vzorků (a) skupiny č. 2, (b) skupiny č. 3, (c) skupiny č. 4, (d) skupiny č. 5.

Vliv obsahu vodivé komponenty

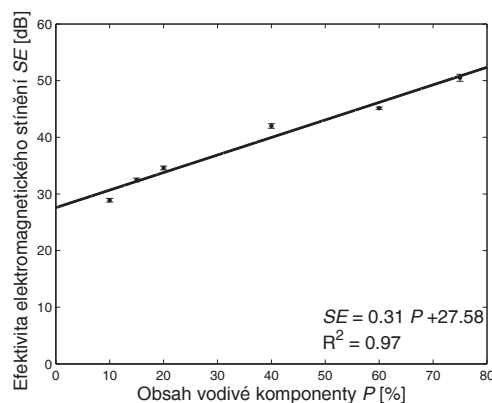
Závislost efektivity elektromagnetického záření pro frekvenci 1.5 GHz (frekvence blízká pracovní frekvenci mobilních telefonů) na obsahu vodivé komponenty (P) vzorků skupiny č. 1 je zobrazena na obr. 6.23. Tkanina bez obsahu vodivé komponenty vykazuje nulovou schopnost stínit elektromagnetické záření. Již při zvýšení obsahu vodivé komponenty na 1 % dosahuje tkanina efektivity stínění 17 dB. Při použití 20 % kovového vlákna v hybridní přízi dosahuje vzorek stínící účinnosti až 30 dB, což překračuje požadavky na elektromagneticky stínící textilie pro obecné použití. Perkolační práh P_0 vodivé komponenty je možno pozorovat v oblasti 3-5 %. Vzrůst SE na obsahu vodivé komponenty je možno popsat pomocí mocninné funkce. Závislost efektivity stínění na P v oblasti nad P_0 může být aproximována pomocí lineární funkce, viz obr. 6.23(b). Plná čára v grafu koresponduje s lineárním regresním modelem s parametry získanými metodou nejmenších čtverců. Tento regresní model může být využit pro predikci obsahu vodivé komponenty P za účelem získání výrobku s dostatečnou stínící účinností odpovídající účelu použití. Pro vzorky skupiny č. 1 platí

$$P = \frac{SE - 27.58}{0.31}. \quad (6.17)$$

Např. tkanina s elektromagnetickou stínící účinností $SE = 35$ dB může být získána použitím obsahu vodivé komponenty $P = 24$ %. Totožné chování (lineární vztah mezi



(a)

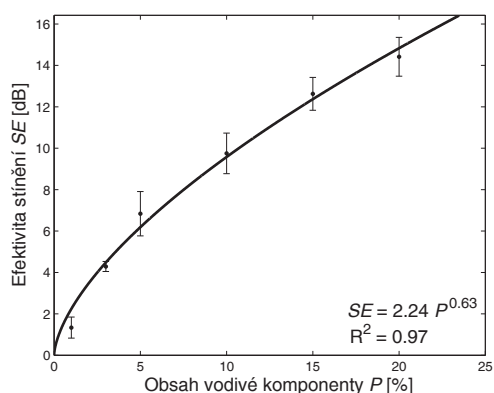


(b)

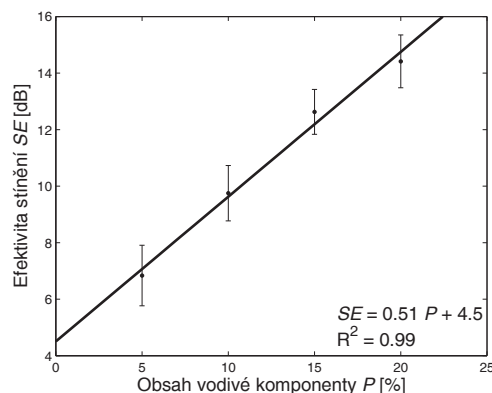
Obrázek 6.23: Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na obsahu vodivé komponenty pro (a) veškeré vzorky skupiny č. 1, (b) vzorky skupiny č. 1 s obsahem vodivé komponenty nad perkolačním prahem P_0 .

obsahem vodivé komponenty a efektivitou stínění elektromagnetického pole v oblasti nad perkolačním prahem) bylo pozorováno i pro další frekvence (např. 600 MHz, 2.45 GHz).

Závislost efektivity elektromagnetického záření pro frekvenci 1.5 GHz na obsahu vodivé komponenty P vzorků skupiny č. 3 je zobrazena na obr. 6.24. Je zřejmé, že tkanina bez obsahu tzv. vodivé mřížky vykazuje nulovou schopnost stínit elektromagnetické záření. Tkanina obsahující vodivou mřížku o velikosti 5x5 mm tvořenou hybridní přízí obsahující 1 % kovového vlákna dosahuje SE okolo 1 dB. Při použití 10%, resp. 20% hybridní příze pro tvorbu mřížky získává tkanina schopnost stínit elektromagnetické pole ve výši cca 10, resp. 14 dB. Vzrůst efektivity stínění na obsahu vodivé komponenty je možno popsat pomocí mocninné funkce. Závislost SE na P v oblasti nad P_0 může být aproximována pomocí lineární funkce, viz obr. 6.24(b). Plná čára v grafu koresponduje s lineárním regresním modelem, který může být s výhodou využit pro předpověď požadované stínící účinnosti. Totožné chování (lineární vztah mezi obsahem vodivé komponenty a efektivitou stínění elektromagnetického pole v oblasti na perkolačním prahem) bylo pozorováno i pro další frekvence (např. 600 MHz, 2.45 GHz).

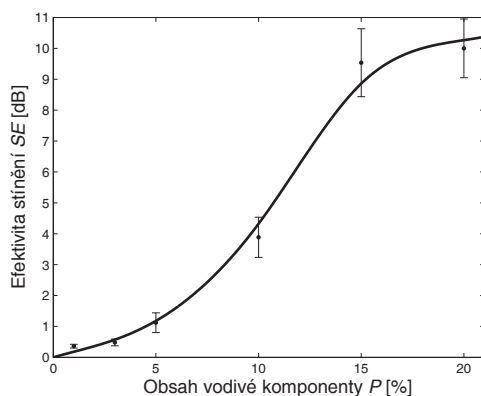


(a)



(b)

Obrázek 6.24: Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na obsahu vodivé komponenty pro (a) veškeré vzorky skupiny č. 3, (b) vzorky skupiny č. 3 s obsahem vodivé komponenty nad perkolačním prahem.

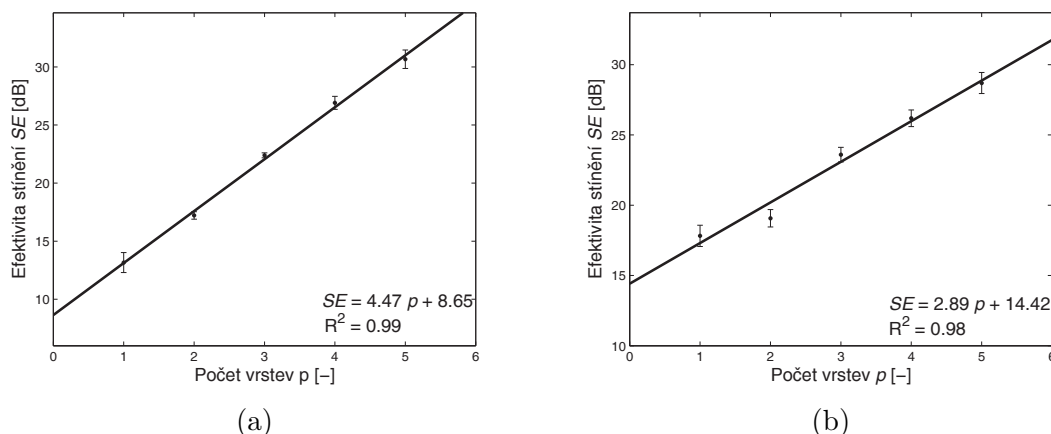


Obrázek 6.25: Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na obsahu vodivé komponenty pro vzorky skupiny č. 4.

Závislost efektivity elektromagnetického záření pro frekvenci 1 GHz na obsahu vodivé komponenty P vzorků skupiny č. 4, tedy pletenin, je zobrazena na obr. 6.25. Je viditelné, že pletenina bez obsahu vodivé komponenty vykazuje nulovou schopnost stínit elektromagnetické záření. Pletenina obsahující 1 % kovového vlákna dosahuje SE nižší než 1 dB. Při použití 20% hybridní příze pletenina vykazuje SE cca 10 dB. I u této sady vzorků lze pozorovat zvyšující se schopnost stínit elektromagnetické pole se zvyšujícím se obsahem kovového vlákna v pletenině. Závislost efektivity stínění na obsahu vodivé komponenty byla aproximována kubickou vyhlazovací spline křivkou s tolerancí 0.14. Perkolační práh se v tomto případě pohybuje okolo 10 % kovového vlákna ve vzorku.

Vliv počtu vrstev

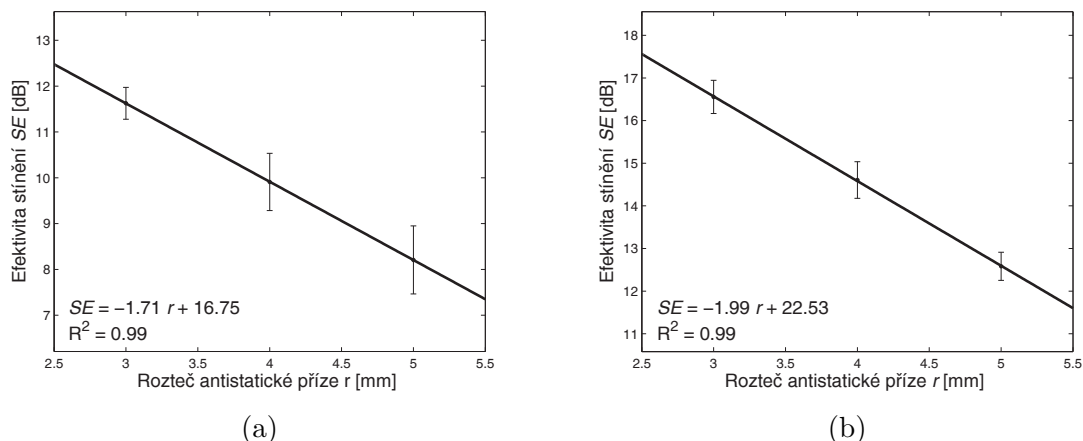
Závislost účinnosti elektromagnetického záření na počtu vrstev tkaniny označené T1 je zobrazena na obr. 6.26. Je možno si povšimnout, že se zvyšujícím se počtem vrstev tzv. sendviče se zvyšuje i celková účinnosti elektromagnetického stínění, a to lineárně. Při frekvenci 1.5 GHz dosahuje jedna vrstva vzorku T1 stínící účinnosti cca 13 dB. Při použití tří vrstev vzorku T1 získává tzv. sendvič stínící účinnost cca 22 dB, což odpovídá jedné vrstvě vzorku obsahujícího 5 % vodivé komponenty. Stínící účinnost se dále zvýší na 30 dB při použití pěti vrstev tkaniny obsahující 1 % vodivé komponenty, což odpovídá při totožné frekvenci účinnosti elektromagnetického stínění jednovrstvého vzorku obsahujícího cca 10 % kovového vlákna. Z uvedeného vyplývá, že z hlediska množství kovového vlákna je pro získání vyšší elektromagnetické stínící účinnosti výhodnější využití tzv. sendvičového systému.



Obrázek 6.26: Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na počtu vrstev vzorku T1 pro frekvenci (a) 1.5 GHz, (b) 2.45 GHz.

Vliv velikosti vodivé mřížky

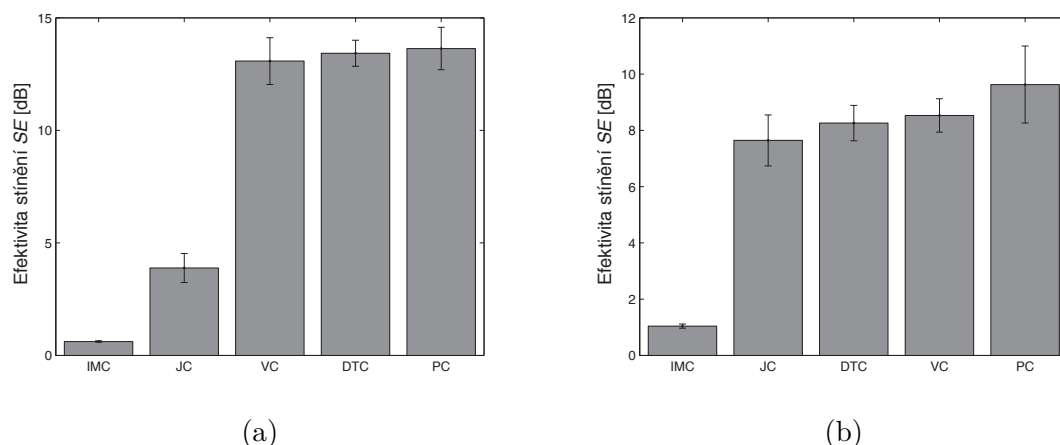
Závislost účinnosti elektromagnetického stínění na rozteči antistatické příze tvořící mřížku a nevodivý výplněk je zobrazena na obr. 6.27. Se zvyšující se roztečí hybridní příze v osnově a útku se účinnost elektromagnetického stínění snižuje. Závislost je možno aproximovat lineární funkcí



Obrázek 6.27: Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na rozteči hybridní příze tvořící tzv. vodivou mřížku pro frekvenci (a) 1.5 GHz, (b) 2.45 GHz.

Vliv struktury

Při porovnání elektromagnetické stínící účinnosti pletených vzorků se vzorky tkanými je zřejmé, že vzorky pletené dosahují při stejném obsahu vodivé komponenty výrazně nižších hodnot SE. Tento jev je způsoben otevřenější strukturou pleteniny a použitím jemnější příze, resp. nižší plošnou hmotností vzorku. Na obrázku 6.28 je zobrazeno porovnání elektromagnetické stínící účinnosti pletených vzorků pocházejících ze skupiny č. 4. Nejnižších hodnot SE dosahuje vzorek interlockové vazby, a to při všech studovaných frekvencích. Pro frekvenci 1 GHz dosahují nejvyšších hodnot SE (cca 13 dB) vzorky vazby jedolínční výplněk (JC), double face (DTC) a pique (PC). Při $f = 1.5$ GHz se pohybuje SE vzorků JC, DTC, VC a PC v oblasti SE kolem 8 dB. Nižší stínící schopnost vykazuje vzorek IMC, a to kolem 1 dB.



Obrázek 6.28: Elektromagnetická stínící účinnost vzorků skupiny č. 4 pro frekvenci (a) 1 GHz, (b) 1.5 GHz.

6.2.4 Studium vlivu údržby na elektromagnetickou stínící účinnost

Pro testování vlivu údržby byly vybrány dva zástupci doposud vyvinutých textilií - tkaný vzorek skupiny č. 1 označený T15 a pletený vzorek skupiny č. 4 označený P15. Zvolené vzorky obsahují dostatečně vysoký obsah kovového vlákna tak, aby byl překročen perkolační práh a bylo dosaženo uspokojivých hodnot stínění elektromagnetického pole.

Simulace údržby textilie praním ve vodě s obsahem pracích prostředků

Materiál byl podroben opakovanému domácímu praní dle ČSN EN ISO 6330 za pomoci praní automatickou pračkou typu Miele professional W6071 s vodorovným bubnem plněným zepředu a sušení pomocí bubnové sušičky (Miele Professional PT 5137). Byly použity následující parametry praní: teplota hlavní prací lázně 40 °C, 3 kroky máchání, odstředění 900 ot./min., detergent: standardní detergent č. 2. Jako doplňkové textilie byly použity tkané textilie materiálového složení 100% CO. K sušení prádla v sušičce byl zvolen šetrný program nazvaný výrobcem Outdoor v délce cca 45 min.

Údržba textilie (1x prací cyklus + 1x sušení) byla provedena opakovaně 1x, 2x, 4x, 6x, 8x, 10x, 12x, 14x, 16x, 18x a 20x za účelem simulace reálné údržby textilie při používání. Postup byl opakován a postupně byly odebírány vzorky s daným stupněm údržby.

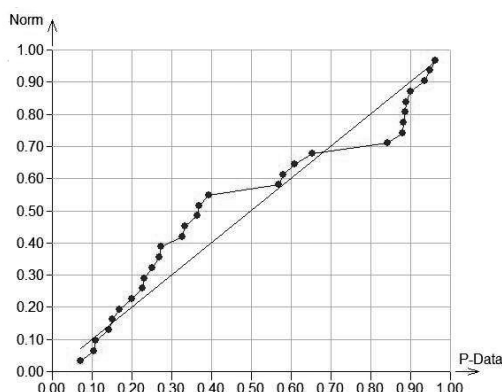
Hodnocení elektrické vodivosti

Vzorky byly hodnoceny dle výše jejich povrchové a objemové rezistivity. Tyto parametry je možno vypočíst ze znalosti hodnot povrchového a objemového odporu, příslušných rozměrů měřících elektrod, případně tloušťky vzorku. Průběh měření obou rezistivit vč. specifikace použitých norem je popsán v kapitole 6.2.2. Objemový a plošný odpor byl měřen vždy minimálně na 30 odlišných místech každého vzorku textilie.

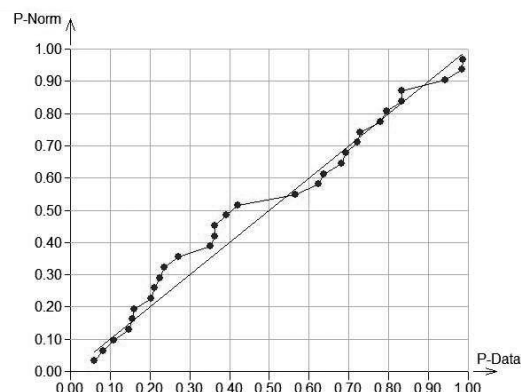
Statistické vyhodnocení naměřených dat

I tomto případě bylo potvrzeno (za pomoci testu kombinace výběrové šikmosti a špičatosti), že naměřená data objemového a povrchového odporu pochází z normálního rozdělení. Pro grafické porovnání výběrového rozdělení s teoretickým normálním rozdělením byl zvolen pravděpodobnostní graf, viz obr. 6.29. Pro další interpretaci výsledků byl pro odhad střední hodnoty zvolen aritmetický průměr a 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty.

V tabulce 6.23 jsou uvedeny průměrné hodnoty povrchové a objemové rezistivity spolu s intervaly spolehlivosti pro vzorek T15 (tkanina keprové vazby tvořená 100 % hybridní příze s obsahem 15 % nerezového ocelového vlákna. V tabulce 6.24 jsou uvedeny průměrné hodnoty povrchové a objemové rezistivity spolu s intervaly spolehlivosti pro vzorek P15 (jednolící pletenina tvořená 100 % hybridní příze s obsahem 15 % nerezového ocelového vlákna.



(a)



(b)

Obrázek 6.29: Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením (a) povrchového odporu, (b) objemového odporu s normálním rozdělením.

Tabulka 6.23: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity vzorku T15.

Počet cyklů údržby	Povrchová rezistivita ρ_s [Ω]		Objemová rezistivita ρ_v [$\Omega \cdot \text{cm}$]	
	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
0	1.36E+05	$\pm 3.84\text{E}+04$	4.16E+06	$\pm 6.41\text{E}+05$
1	3.72E+05	$\pm 9.87\text{E}+04$	1.40E+07	$\pm 1.38\text{E}+06$
2	6.01E+05	$\pm 1.92\text{E}+05$	2.06E+07	$\pm 4.43\text{E}+06$
4	1.15E+06	$\pm 1.93\text{E}+05$	5.01E+07	$\pm 5.32\text{E}+06$
6	2.37E+06	$\pm 6.55\text{E}+05$	1.78E+08	$\pm 8.31\text{E}+07$
8	1.36E+07	$\pm 7.79\text{E}+06$	7.46E+08	$\pm 2.20\text{E}+08$
10	7.62E+06	$\pm 4.26\text{E}+06$	9.06E+08	$\pm 2.81\text{E}+08$
12	2.71E+07	$\pm 2.48\text{E}+07$	7.21E+08	$\pm 3.52\text{E}+08$
14	9.72E+06	$\pm 9.45\text{E}+06$	1.15E+09	$\pm 3.92\text{E}+08$
16	5.71E+07	$\pm 5.14\text{E}+07$	9.10E+08	$\pm 3.06\text{E}+08$
18	4.74E+07	$\pm 4.30\text{E}+07$	8.23E+08	$\pm 2.85\text{E}+08$
20	6.72E+07	$\pm 5.27\text{E}+07$	1.26E+09	$\pm 4.20\text{E}+08$

Vliv praní na elektrickou vodivost textilií

Na obr. 6.30 jsou znázorněny závislosti přirozeného logaritmu povrchové a objemové rezistivity na počtu pracích cyklů pro vzorek T15. Z uvedených grafů je se jeví, že se rezistivita se zvyšující se údržbou praním mírně zvyšuje, což je zřejmě způsobeno migrací kovového vlákna ze struktury příze. Závislost přirozeného logaritmu obou rezistivit na počtu pracích cyklů (pc) je možno popsat pomocí lineární funkce.

Vzhledem k malé směrnici lineární regresní funkce a za účelem potvrzení významnosti vlivu praní byla provedena analýza lineárního regresního modelu ve tvaru $y = b_1x + b_2$ v programu Matlab, jejíž výstupem je závěr Fisherova-Snedecorova F -testu o významnosti koeficientů determinace a výsledky Studentova t -testu o významnosti jednotlivých parametrů b_i , kde

Tabulka 6.24: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity vzorku P15.

Počet cyklů údržby	Povrchová rezistivita ρ_S [Ω]		Objemová rezistivita ρ_V [$\Omega \cdot \text{cm}$]	
	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
0	2.44E+07	$\pm 4.05\text{E}+06$	1.64E+08	$\pm 1.08\text{E}+08$
1	1.54E+07	$\pm 2.60\text{E}+06$	3.06E+08	$\pm 1.08\text{E}+08$
2	2.98E+07	$\pm 2.59\text{E}+06$	7.42E+08	$\pm 1.80\text{E}+08$
4	2.88E+07	$\pm 3.64\text{E}+06$	6.25E+08	$\pm 1.18\text{E}+08$
6	3.02E+07	$\pm 5.88\text{E}+06$	7.89E+08	$\pm 1.31\text{E}+08$
8	5.61E+07	$\pm 4.02\text{E}+06$	1.51E+09	$\pm 1.81\text{E}+08$
10	1.18E+08	$\pm 2.69\text{E}+07$	4.10E+09	$\pm 1.27\text{E}+09$
12	1.05E+08	$\pm 2.97\text{E}+07$	3.38E+09	$\pm 1.14\text{E}+09$
14	2.37E+08	$\pm 4.15\text{E}+07$	7.35E+09	$\pm 1.43\text{E}+09$
16	5.48E+08	$\pm 1.39\text{E}+08$	9.65E+09	$\pm 1.73\text{E}+09$
18	3.44E+08	$\pm 1.19\text{E}+08$	1.34E+10	$\pm 4.43\text{E}+09$
20	2.58E+08	$\pm 6.53\text{E}+07$	1.25E+10	$\pm 3.35\text{E}+09$

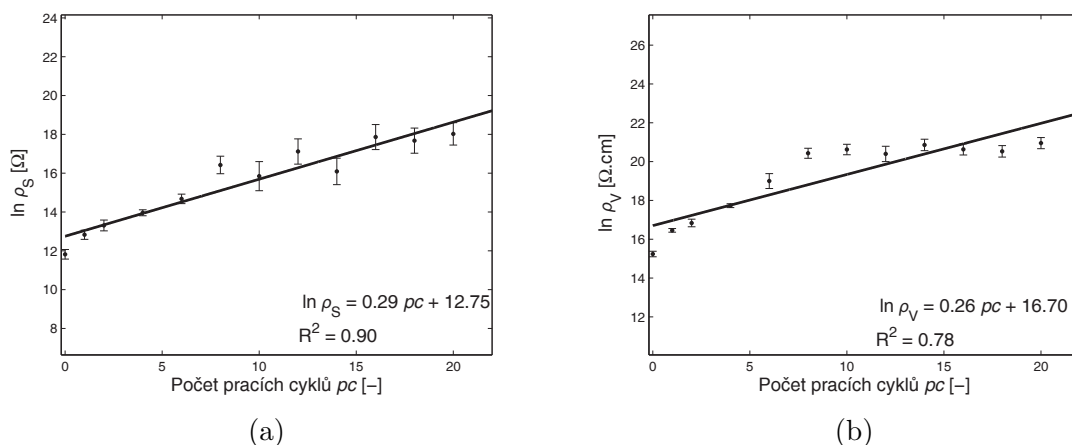
$$H_0 : b_i = 0; \quad H_A : b_i \neq 0. \quad (6.18)$$

Výčíslené testační statistiky významnosti obou parametrů jsou $T_1 = 9.75$ a $T_2 = 37.29$, přičemž $t_{0.75}(10) = 2.228$. Testační statistika F_R má hodnotu 94.97 (kvantil F-rozdělení $F_{0.95}(1, 10) = 4.96$) a koeficient determinace $R^2 = 0.90$, což vede k závěru, že model je považován za vhodný a oba regresní parametry b_1 a b_2 jsou významně odlišné od nuly. Na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ je tedy nulová hypotéza zamítnuta a potvrzena významnost vlivu praní na povrchovou rezistivitu vzorku.

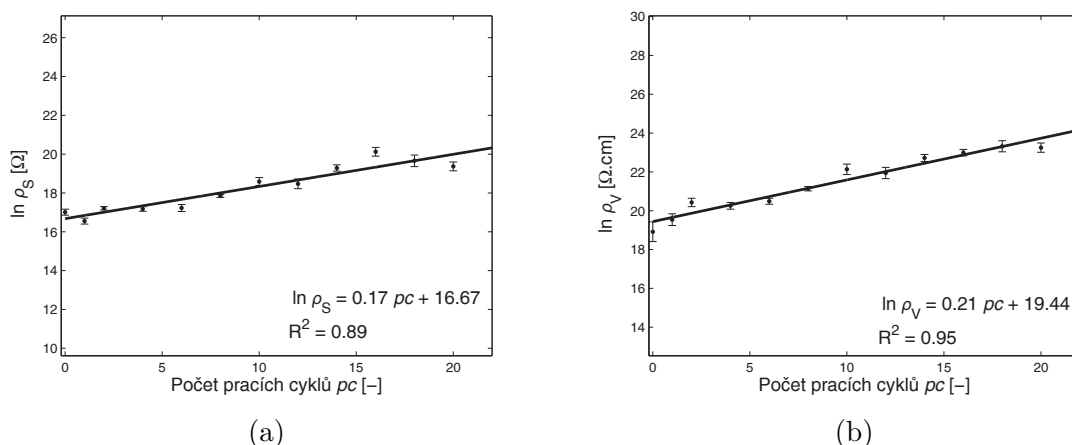
Obdobně, lineární regresní model popisující závislost objemové rezistivity na počtu pracích cyklů má následující odhady parametrů: $b_1 = 0.26$ a $b_2 = 16.70$. Testační statistiky významnosti obou parametrů jsou $T_1 = 6.04$ a $T_2 = 33.76$. Testační statistika F_R má hodnotu 36.45 a koeficient determinace $R^2 = 0.78$, což potvrzuje předpoklad, že model je považován za vhodný a oba regresní parametry b_1 a b_2 jsou významně odlišné od nuly. Na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ je tedy nulová hypotéza zamítnuta a potvrzen předpoklad, že praní má významný vliv také na objemovou rezistivitu vzorku.

Z vyhodnocení lze konstatovat, že po deseti cyklech údržby praním se rezistivita zvýšila cca o 2 řády, po dvaceti cyklech je možno pozorovat nárůst oproti vzorku referenčnímu o cca 3 řády. Lze předpokládat, že v souladu se zvyšováním rezistivity a snížením elektrické vodivosti vzorku se bude snižovat schopnost vzorku odstínit elektromagnetického pole, avšak i po dvaceti cyklech údržby bude mít vzorek nadále určitou schopnost zabránit průchodu elektromagnetického pole.

Na obr. 6.31 jsou znázorněny závislosti přirozeného logaritmu povrchové a objemové rezistivity na počtu pracích cyklů pro vzorek P15. I u pleteného vzorku je patrné, že se údržbou praním elektrická vodivost mírně snižuje, resp. rostou hodnoty plošné a objemové rezistivity. Závislost přirozeného logaritmu rezistivit na počtu pracích cyklů pc je možno popsat pomocí lineární funkce. Analýza lineárního modelu byla provedena pro závislost jak povrchové, tak objemové rezistivity pleteného vzorku na počtu pracích



Obrázek 6.30: Závislost (a) povrchové, (b) objemové rezistivity na počtu pracích cyklů pro vzorek T15.



Obrázek 6.31: Závislost (a) povrchové, (b) objemové rezistivity na počtu pracích cyklů pro vzorek P15.

cyklů. V obou případech bylo ověřeno, že na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ se nulová hypotéza ($H_0 : b_i = 0$) zamítá a potvrzen předpoklad, že praní má významný vliv také na objemovou a povrchovou rezistivitu vzorku pleteného.

Z měření vyplývá, že po deseti cyklech údržby praním se rezistivita pleteniny zvýšila cca o 1 řád, po dvaceti cyklech je možno pozorovat nárůst oproti vzorku referenčnímu o cca 2 řády. Vzorek pletený dosáhl nižších změn ve výši rezistivit po aplikaci údržby praní než vzorek tkaný. V souladu se zvýšením rezistivit po praní lze předpokládat pokles bariérní schopnosti pletenin. Tento předpoklad bude ověřen přímým měřením efektivity elektromagnetického stínění.

Hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti

Efektivita stínění (SE) textilií byla hodnocena dle normy ASTM 4935-99, která je určena pro hodnocení plošných materiálů. Tato norma pracuje s předpokladem dopadu rovinné vlny na stínící přepážku v blízké zóně elektromagnetického pole. Efektivita stínění vzorků byla měřena ve frekvenční oblasti 30 MHz až 1.5 GHz. Použité přístroje vč. charakteristiky rozměrů vzorků jsou popsány v kapitole 6.2.3. Efektivita elektromagnetického stínění byla měřena vždy na minimálně 5 odlišných místech vzorku textilie

podrobené údržbě praním. V případě tkaného vzorku byla získaná závislost SE na frekvenci aproximována pomocí zobecněné logaritmické funkce. Pro aproximaci závislosti efektivity stínění na frekvenci pleteného vzorku bylo využito kubického vyhlazovacího spline, viz kapitola 6.2.3.

Statistické vyhodnocení naměřených dat

Z důvodu relativně nízkého počtu měření byla pro statistické vyhodnocení aplikována analýza malých výběrů obdobně jako v kapitole 6.2.3. V tabulce 6.25 a 6.26 jsou uvedeny pivotové polosumy SE spolu s intervaly spolehlivosti pro vzorek T15 a P15.

Tabulka 6.25: Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty SE vzorku T15.

Počet pracích cyklů [-]	Efektivita elektromagnetického stínění SE [dB]					
	$f=600$ MHz		$f=1$ GHz		$f=1.5$ GHz	
	P_L	95% IS	P_L	95% IS	P_L	95% IS
0	27.41	± 0.13	30.35	± 0.25	32.47	± 0.33
1	25.77	± 0.80	29.03	± 0.59	31.40	± 0.80
2	24.85	± 0.63	28.25	± 0.55	30.78	± 0.45
4	25.15	± 1.02	28.52	± 0.86	30.99	± 0.93
6	24.35	± 1.09	27.81	± 0.91	30.41	± 0.96
8	24.52	± 0.56	27.99	± 0.53	30.60	± 0.37
10	24.35	± 0.84	27.89	± 0.76	30.58	± 0.55
12	24.32	± 0.87	27.80	± 0.81	30.41	± 0.70
14	23.55	± 0.35	27.19	± 0.30	29.97	± 0.29
16	23.22	± 0.29	26.88	± 0.28	29.69	± 0.35
18	23.57	± 0.43	27.18	± 0.33	29.92	± 0.26
20	22.83	± 0.66	26.53	± 0.53	29.40	± 0.54

Tabulka 6.26: Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty SE vzorku P15.

Počet pracích cyklů [-]	Efektivita elektromagnetického stínění SE [dB]					
	$f=600$ MHz		$f=1$ GHz		$f=1.5$ GHz	
	P_L	95% IS	P_L	95% IS	P_L	95% IS
0	4.03	± 1.14	9.21	± 0.42	9.75	± 0.18
1	3.78	± 0.19	9.28	± 0.21	9.66	± 0.25
2	3.88	± 0.27	9.26	± 0.26	9.69	± 0.28
4	4.28	± 0.27	9.78	± 0.32	9.46	± 0.52
6	4.28	± 0.38	9.86	± 0.60	9.45	± 0.17
8	3.04	± 0.13	7.65	± 0.19	9.88	± 0.24
10	3.29	± 0.25	8.19	± 0.67	9.91	± 0.38
12	3.96	± 0.32	9.47	± 0.65	9.41	± 0.32
14	3.59	± 0.26	8.75	± 0.44	9.66	± 0.28
16	2.44	± 0.22	6.41	± 0.50	10.20	± 0.17
18	3.21	± 0.31	8.20	± 0.61	9.65	± 0.26
20	3.26	± 0.30	8.26	± 0.59	9.83	± 0.32

Vliv praní na efektivitu elektromagnetického stínění

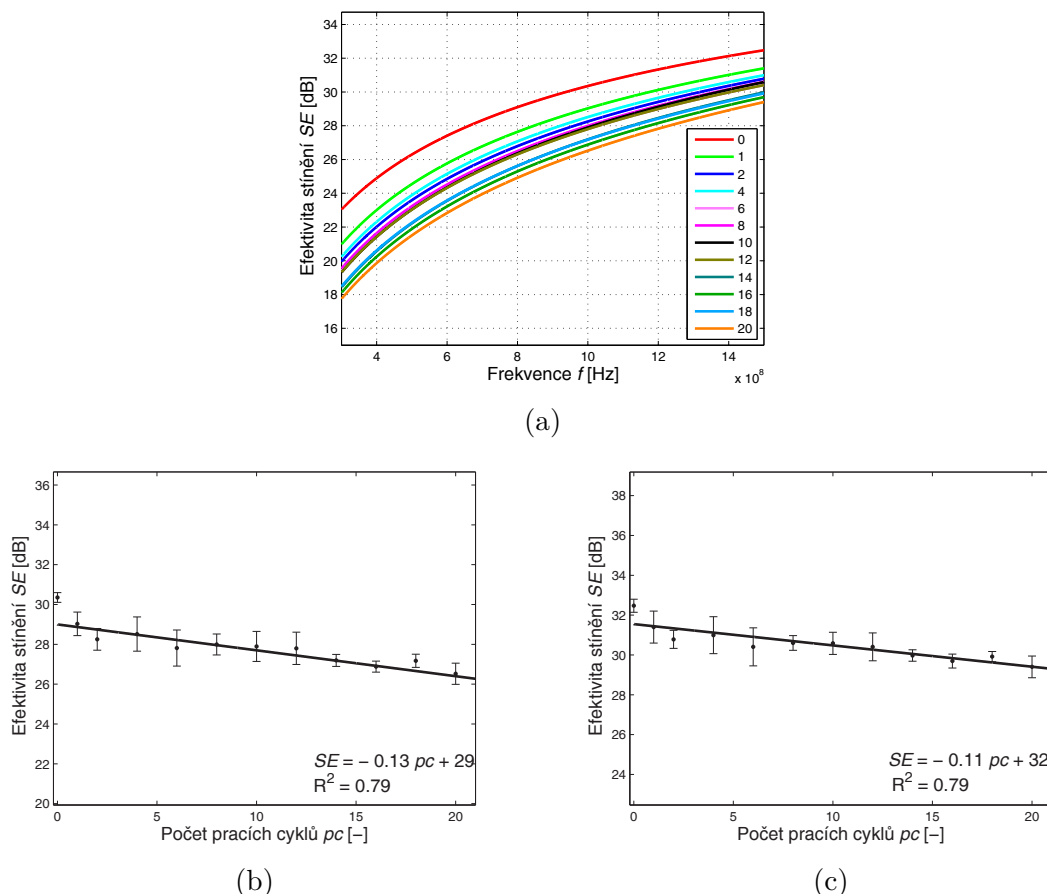
Na obrázku 6.32(a) je zobrazena frekvenční závislost SE vzorku T15 podrobenému různému počtu pracích cyklů. Lze pozorovat, že vzorek nepraný dosahuje nejvyšších hodnot elektromagnetické stínící efektivity na celém frekvenčním pásmu. Se vzrůstajícím stupněm praní se stínící efektivita materiálu snižuje úměrně pro veškeré frekvence. Na obrázku 6.32(b,c) jsou zobrazeny závislosti efektivity elektromagnetického stínění vzorku T15 na počtu pracích cyklů pro frekvenci 1 GHz, resp. 1.5 GHz. Z obrázků lze pozorovat, že SE poklesne po 10 pracích cyklech cca o 2 dB oproti původní hodnotě SE nepraného vzorku. Po 20 cyklech praní stínící účinnost poklesne cca o 3 dB. Závislost efektivity elektromagnetického stínění SE na počtu pracích cyklů (pc) lze popsat pomocí lineární funkce.

Pro potvrzení významnosti vlivu praní na výši efektivity elektromagnetického stínění vzorků byla provedena analýza regresního modelu ve tvaru $y = b_1x + b_2$ v programu Matlab, jejíž výstupem je závěr Fisherova-Snedecorova F -testu o významnosti koeficientů determinace a výsledky t -testu o významnosti jednotlivých parametrů b_i . Použití lineárního regresního modelu pro závislost SE na počtu pracích cyklů má pro $f = 1$ GHz následující odhady parametrů: $b_1 = -0.13$ a $b_2 = 29.19$. Vyčíslené testační statistiky významnosti obou parametrů jsou $T_1 = -6.21$ a $T_2 = 118.84$, přičemž $t_{0.75}(10) = 2.228$. Testační statistika F_R má hodnotu 38.62 (kvantil F -rozdělení $F_{0.95}(1, 10) = 4.96$) a koeficient determinace $R^2 = 0.79$, což vede k závěru, že model je považován za vhodný a oba regresní parametry b_1 a b_2 jsou významně odlišné od nuly. Na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ je tedy nulová hypotéza zamítnuta a potvrzena významnost vlivu praní na SE pro frekvenci 1 GHz.

Obdobně pro $f = 1.5$ GHz má lineární regresní model následující odhady parametrů: $b_1 = -0.11$ a $b_2 = 31.55$. Vyčíslené testační statistiky významnosti obou parametrů jsou $T_1 = -6.14$ a $T_2 = 159.16$. Testační statistika F_R má hodnotu 37.65 a koeficient determinace $R^2 = 0.79$. I v tomto případě je možno tedy na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ nulovou hypotézu zamítnout a potvrdit předpoklad významnosti vlivu praní na SE i pro frekvenci 1.5 GHz.

Na obrázku 6.33(a) je zobrazena frekvenční závislost efektivity stínění pleteného vzorku P15 podrobeného různému počtu pracích cyklů. Z grafického zobrazení frekvenční závislosti SE jednotlivých vzorků není zřejmý jednoznačný trend vlivu praní. Na obrázku 6.33(b,c) jsou zobrazeny závislosti efektivity elektromagnetického stínění vzorku P15 na počtu pracích cyklů pro frekvenci 1 GHz, resp. 1.5 GHz. Na obrázku 6.33(b) lze pozorovat pokles SE se vzrůstem počtu aplikovaných cyklů údržby. Po 20 cyklech praní efektivita elektromagnetického stínění poklesne cca o 1 dB při frekvenci $f = 1$ GHz v porovnání s výší SE nepraného vzorku. Závislost efektivity elektromagnetického stínění na počtu pracích cyklů (pc) lze popsat pomocí lineární funkce. Při průzkumu závislosti SE na počtu pracích cyklů pro frekvenci $f = 1.5$ GHz se zdá, že se efektivita elektromagnetického stínění se vzrůstajícím počtem aplikací údržby na vzorku nemění.

Pro potvrzení významnosti vlivu praní na výši efektivity elektromagnetického stínění vzorků pro obě vybrané frekvence byla provedena analýza regresního modelu ve tvaru $y = b_1x + b_2$ v programu Matlab, jejíž výstupem je závěr Fisherova-Snedecorova F -testu o významnosti koeficientů determinace a výsledky t -testu o významnosti jednotlivých parametrů b_i . Použití lineárního regresního modelu pro závislost SE na počtu pracích



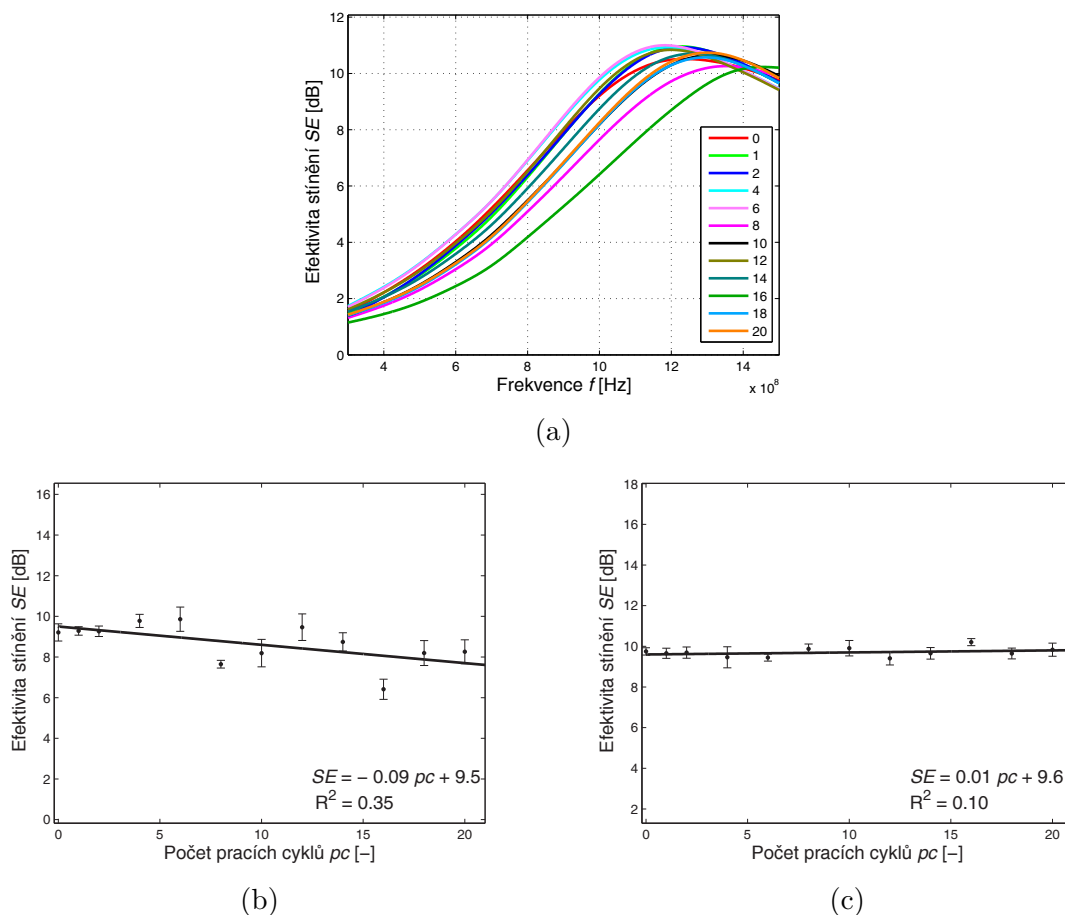
Obrázek 6.32: (a) Frekvenční závislost SE pro vzorek T15 podrobený různému počtu praní; závislost SE na počtu pracích cyklů vzorku T15 pro frekvenci (b) 1 GHz, (c) 1.5 GHz.

cyklů má pro $f = 1$ GHz následující odhady parametrů: $b_1 = -0.09$ a $b_2 = 9.49$. Vyčíslené testační statistiky významnosti obou parametrů jsou $T_1 = -2.30$ a $T_2 = 22.35$, přičemž $t_{0.75}(10) = 2.228$. Testační statistika F_R má hodnotu 5.30 (kvantil F-rozdělení $F_{0.95}(1, 10) = 4.96$) a koeficient determinace $R^2 = 0.35$, což vede k závěru, že model je považován za vhodný a oba regresní parametry b_1 a b_2 jsou odlišné od nuly. Na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ je tedy nulová hypotéza zamítnuta a potvrzena významnost vlivu praní na SE pro frekvenci 1 GHz.

Obdobně pro $f = 1.5$ GHz má lineární regresní model následující odhady parametrů: $b_1 = 0.01$ a $b_2 = 9.62$. Vyčíslené testační statistiky významnosti obou parametrů jsou $T_1 = 1.05$ a $T_2 = 85.67$. Testační statistika F_R má hodnotu 1.09 a koeficient determinace $R^2 = 0.1$. V tomto případě tedy na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ nulovou hypotézu nezamítáme a lze tvrdit, že předpoklad významnosti vlivu praní na SE pro frekvenci 1.5 GHz nebyl potvrzen.

Vliv praní na žmolkovitost vzorků

Tkaniny a pleteniny vyrobené z přízí syntetických mají sklon k tzv. žmolkování. Hladká vlákna se vlivem namáhání při nošení a praní postupně uvolňují z příze a migrují na povrch textilie. Protože zůstávají částečně fixována v přízi, shlukují se, vytváření žmolky, které vzhledem k pevnosti syntetických neodpadnou ani v místech zvýšeného mechanického namáhání a kazí estetický vzhled výrobku.

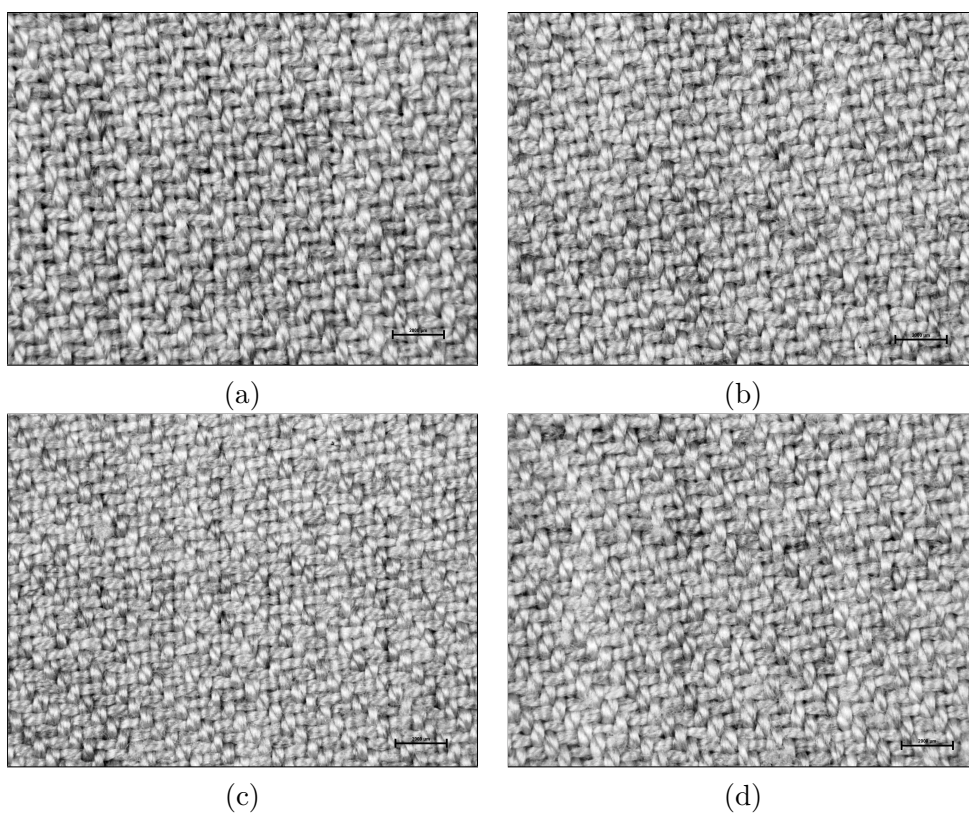


Obrázek 6.33: (a) Frekvenční závislost SE pro vzorek P15 podrobený různému počtu praní; závislost SE na počtu pracích cyklů vzorku P15 pro frekvenci (b) 1 GHz, (c) 1.5 GHz.

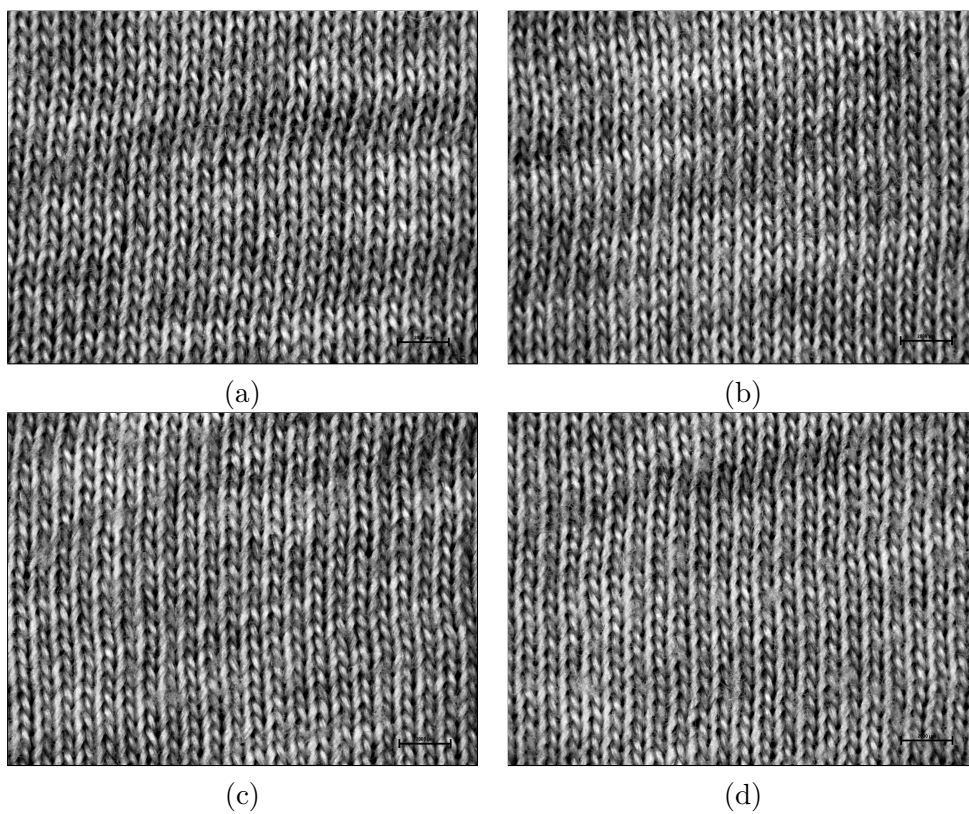
Cílem této podkapitoly bylo zjistit, zda mají nově vyvinuté textilie sklon ke tvorbě žmolků, testován byl vliv praní.

Na obrázku 6.34 jsou zobrazeny mikroskopické snímky vzorku tkaniny T15, tj. tkaného vzorku obsahujícího 15 % nerezového ocelového vlákna před praním, po 6, 10 a 20 cyklech praní. Z obrázků je možno pozorovat zvyšující se chlupatost povrchu tkanin po aplikaci opakovaného praní. Výraznou přítomnost však žmolků nebylo možno pozorovat ani po 20 cyklech praní.

Na obrázku 6.35 jsou zobrazeny mikroskopické snímky vzorku pleteniny P15, tj. pleteného vzorku obsahujícího 15 % nerezového ocelového vlákna před praním, po 6, 10 a 20 cyklech praní. Z obrázků lze pozorovat zvyšující se chlupatost povrchu pleteniny se vzrůstajícím počtem pracích cyklů. Cca po 10 cyklech praní je zřetelná tvorba nízkého stupně žmolkovitosti povrchu vzorků.



Obrázek 6.34: Mikroskopické snímky tkaniny T15 po a) 0 cyklech, b) 6 cyklech, c) 10 cyklech, d) 20 cyklech praní.



Obrázek 6.35: Mikroskopické snímky pleteniny P15 po a) 0 cyklech, b) 8 cyklech, c) 14 cyklech, d) 20 cyklech praní.

6.2.5 Studium vybraných charakteristik souvisejících s komfortem a opotřebením

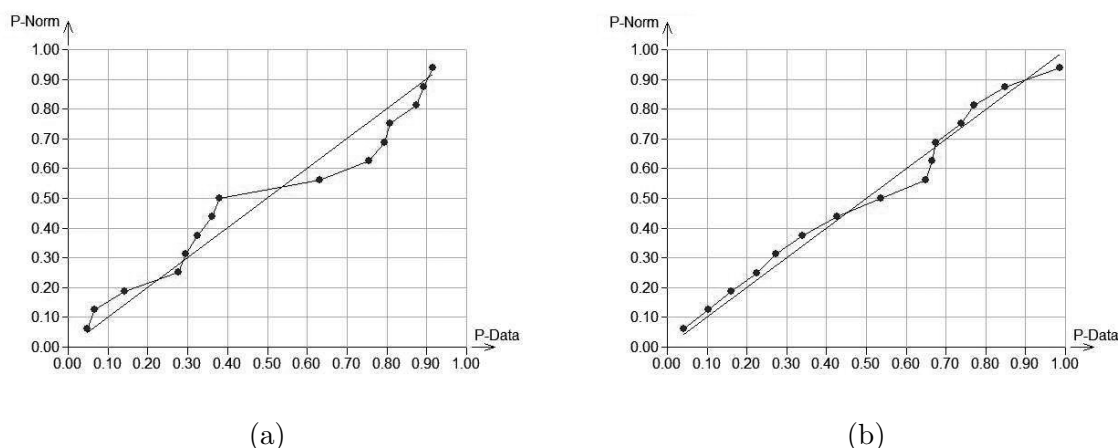
Vyvinuté bariérní textilie, jejichž funkčnost byla ověřována v předešlých kapitolách jsou vhodné nejen pro konstrukci technických stínících krytů, ale díky svým vlastnostem (příznivé materiálové složení, relativně nízká plošná hmotnost a vysoká splývavost) vhodné také pro tvorbu ochranných oděvů. Cílem následujícího experimentálního šetření je zjistit, zda a případně jak ovlivňuje zvýšená přítomnost kovového vlákna ve vzorku vybrané komfortní a užitné vlastnosti.

Termofyziologický komfort byl hodnocen prostřednictvím tepelných vlastností vzorků (tepelné vodivosti a tepelné jímavosti), a to pomocí analyzátoru tepelné vodivosti TCi výrobce C-THERM. Schopnost oděvu transportovat plynnou a kapalnou vlhkost je neméně důležitým parametrem při hodnocení termofyziologického komfortu. Z tohoto důvodu byly jako další stěžejní charakteristiky hodnoceny propustnost textilie pro vodní páry měřená na přístroji Permetest výrobce SENSORA a její propustnost pro vzduch (přístroj FX 3300 výrobce TEXTTEST Instruments). Ohybová tuhost, jež má přímý vliv na splývavost, mačkavost i omak byla zvolena jako zástupce senzorického komfortu. Pro měření byla použita normovaná metoda pomocí přístroje TH5. Z užitných vlastností byla pozorována zejména odolnost textilie v oděru (zkušební přístroj Martindale).

Testování výše zmíněných charakteristik byla podrobena sada tkaných vzorků č. 1 (vzorky označené T1 - T75) obsahující různý obsah kovového vlákna.

Statistické vyhodnocení naměřených dat

Výše zmíněné charakteristiky byly měřeny vždy minimálně na 15 odlišných místech textilie za účelem možnosti dalšího statistického vyhodnocení. Pomocí testu kombinace výběrové šikmosti a špičatosti bylo potvrzeno, že naměřená data vybraných charakteristik pochází z normálního rozdělení. Grafickou interpretaci porovnání výběrového rozdělení s teoretickým normálním rozdělením předvádí pravděpodobnostní P-P graf, viz obr. 6.36. Potvrzen byl také předpoklad homogenity a nezávislosti výběru. Pro další interpretaci výsledků byl pro odhad střední hodnoty zvolen aritmetický průměr a 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty.



Obrázek 6.36: Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením (a) tepelné vodivosti, (b) výparného odporu.

Tabulka 6.27: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti tepelné vodivosti a jímavosti vzorků skupiny č. 1.

Označení	Složení	Tepelná vodivost α [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		Tepelná jímavost b [W.m ⁻² .s ^{0.5} .K ⁻¹]	
		\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
T1	99%PP/1%SS	6.53E-02	±3.47E-04	134.60	±1.09
T3	97%PP/3%SS	6.38E-02	±1.85E-04	129.93	±0.58
T5	95%PP/5%SS	6.40E-02	±4.53E-04	130.53	±1.42
T10	90%PP/10%SS	6.42E-02	±3.28E-04	131.05	±1.03
T15	85%PP/15%SS	6.49E-02	±2.46E-04	133.35	±0.77
T20	80%PP/20%SS	6.57E-02	±2.19E-04	135.72	±0.69
T40	60%PP/40%SS	6.79E-02	±6.49E-04	142.89	±2.03
T60	40%PP/60%SS	7.02E-02	±5.38E-04	150.11	±1.68
T75	25%PP/75%SS	7.12E-02	±3.08E-04	153.85	±0.96

Tabulka 6.28: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti výparného odporu a prodyšnosti vzorků skupiny č. 1.

Označení	Složení	Výparný odpor R_{et} [Pa.m ² .W ⁻¹]		Prodyšnost A_p [l.m ⁻² .s ⁻¹]	
		\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
T1	99%PP/1%SS	4.70	±0.13	152.5	±10.56
T3	97%PP/3%SS	4.00	±0.10	193.0	±8.56
T5	95%PP/5%SS	3.72	±0.08	208.8	±8.40
T10	90%PP/10%SS	3.60	±0.07	268.0	±8.55
T15	85%PP/15%SS	3.38	±0.25	304.6	±18.86
T20	80%PP/20%SS	3.43	±0.24	336.3	±12.48
T40	60%PP/40%SS	3.19	±0.31	466.6	±21.48
T60	40%PP/60%SS	3.26	±0.23	946.2	±33.71
T75	25%PP/75%SS	3.12	±0.21	1512.0	±53.38

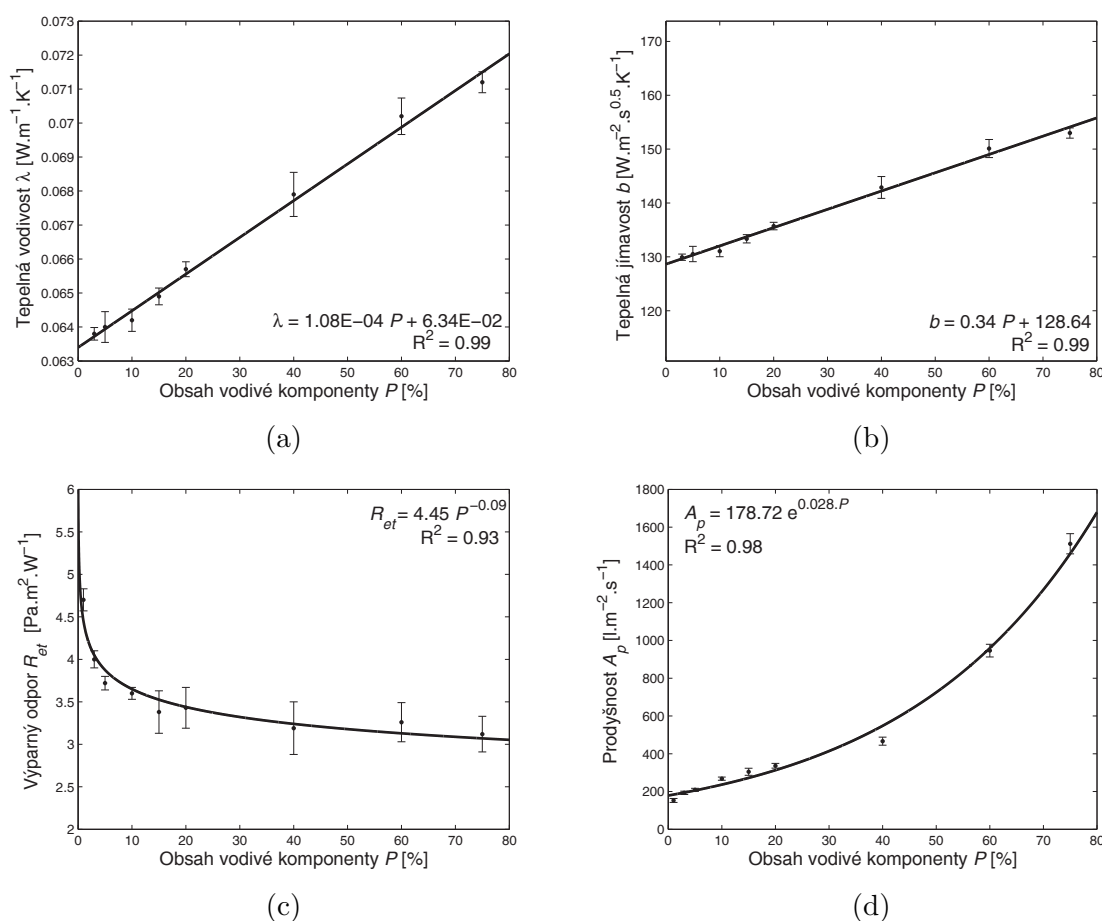
Tabulka 6.29: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti ohybového momentu a hodnoty počtu otáček do porušení prvního vazného bodu vzorků skupiny č. 1

Složení		Ohybový moment M_o [mN.cm]				Počet otáček
		osnova		útek		[-]
		\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS	\bar{x}
T1	99%PP/1%SS	38.82	±1.62	40.55	±1.21	min. 34000
T3	97%PP/3%SS	37.82	±2.20	39.10	±1.51	min. 34000
T5	95%PP/5%SS	36.18	±0.61	35.71	±1.11	32000
T10	90%PP/10%SS	27.93	±1.51	32.22	±1.88	30000
T15	85%PP/15%SS	33.20	±1.62	33.59	±0.71	27000
T20	80%PP/20%SS	30.46	±0.52	28.50	±1.24	8000
T40	60%PP/40%SS	23.71	±1.99	28.31	±1.45	2000
T60	40%PP/60%SS	19.07	±1.77	24.70	±3.06	1500
T75	25%PP/75%SS	19.94	±2.46	22.04	±1.18	500

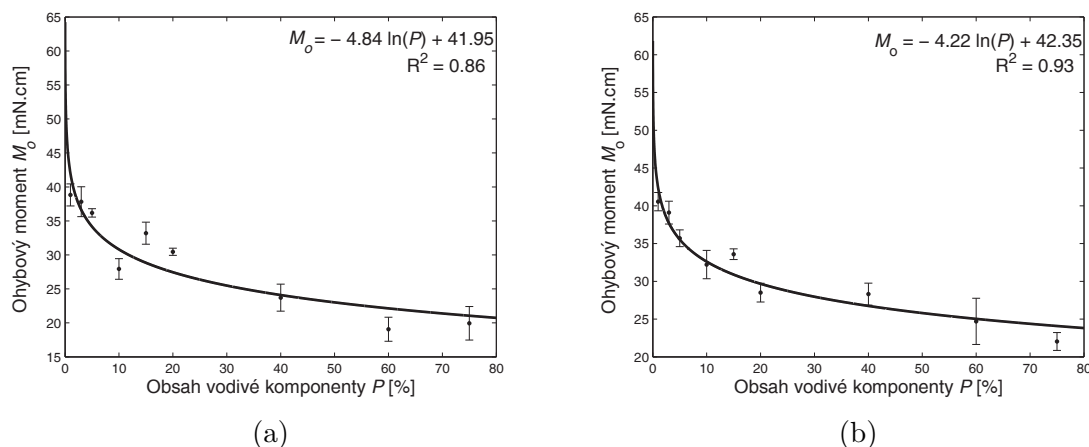
V tabulce 6.27 jsou uvedeny průměrné hodnoty tepelné vodivosti a jímavosti spolu s intervaly spolehlivosti studované sady vzorků. V tabulce 6.28 jsou uvedeny průměrné hodnoty paropropustnosti a prodyšnosti spolu s intervaly spolehlivosti. Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti ohybového momentu měřeného ve směru osnova a útku a hodnoty odolnosti vzorku v oděru (počet otáček do porušení prvního vazného bodu) jsou zobrazeny v tabulce 6.29.

Vliv obsahu kovového vlákna na vybrané tepelné a transportní charakteristiky

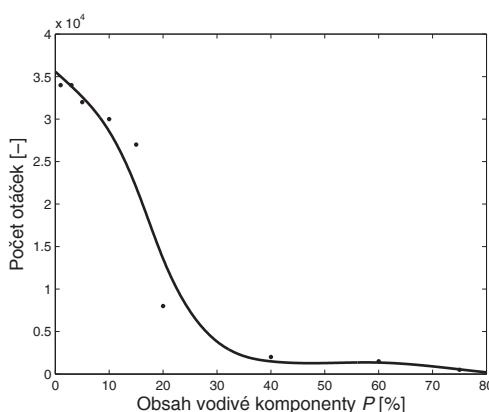
Bylo zjištěno, že tepelná vodivost vzorků skupiny 1 vzrůstá se zvyšující se koncentrací vodivého (nerezového ocelového) vlákna ve struktuře textilie, viz obr. 6.37(a). Stejné chování je možno pozorovat při studiu tepelné jímavosti (6.37b), což je souladu s teoretickým rozbohem. Obě závislosti lze popsat pomocí lineární regresní funkce. Dále bylo zjištěno, že paropropustnost i prodyšnost vrůstá se vrůstajícím obsahem vodivé komponenty jak u vzorků pletených (skupiny 4), tak u vzorků tkaných (skupina 1) jak je možno pozorovat na obr. 6.37(c,d). Tento jev je způsoben skutečností, že kovová vlákna jsou výrazně jemnější než vlákna polypropylenová a příze s vyšším obsahem vodivé komponenty mají nižší průměr. V textilií tak vznikají větší póry mezi přízemi, které umožní snadnější průchod jak pro vzduch (prodyšnost), tak pro vodní páry (paropropustnost). Byl potvrzen předpoklad, že vzorky skupiny pletených vzorků vykazují vyšší prodyšnost i paropropustnost v porovnání se vzorky tkanými.



Obrázek 6.37: Závislost (a) tepelné vodivosti λ , (b) tepelné jímavosti b , (c) výparného odporu R_{et} a (d) prodyšnosti A_p na obsahu nerezového ocelového vlákna ve vzorku.



Obrázek 6.38: Závislost (a) ohybového momentu M_o - měřeného ve směru osnovy, (b) ohybového momentu M_o - měřeného ve směru útku pro vzorky skupiny č. 1.



Obrázek 6.39: Závislost počtu otáček do porušení prvního vazného bodu (odolnost v oděru) pro vzorky skupiny č. 1.

Vliv obsahu kovového vlákna na vybrané mechanické a užité vlastnosti

Po shrnutí provedených měření mechanických a užitných vlastností lze tvrdit, že zvýšením obsahu kovového vlákna ve vzorku došlo ke snížení tuhosti, resp. ohybového momentu 6.38(a,b), čímž byla způsobena vyšší mačkavost. Pozorovat je možno vyšší ohybovou tuhost u vzorků měřených ve směru útku. Snížení tuhosti se zvýšením obsahu vodivé komponenty ve vzorku se projevilo také při hodnocení splývavosti vzorku, tzn. došlo ke zvýšení splývavosti.

Bylo zjištěno, že vzorky obsahující nižší obsah kovového vlákna dosahují velmi uspokojivé odolné vůči oděru – experiment byl ukončen před tím, než došlo k porušení prvního vazného bodu. Na obrázku 6.39 je zobrazena závislost průměrného počtu otáček na obsahu vodivé komponenty ve vzorcích. Závislost počtu otáček na obsahu vodivé komponenty byla aproximována vyhlazovacím spline. Odolnost v oděru se se zvýšením koncentrace nerez ocelových vláken zhoršila, viz obr. 6.39, avšak cca do 15 % vodivé komponenty je dosaženo dostatečné odolnosti v oděru pro oděvní využití. Výrazné snížení odolnosti v oděru je možno pozorovat okolo 20% obsahu vodivé komponenty.

6.2.6 Shrnutí

Cílem této podkapitoly bylo navrhnout, vytvořit a následně z různých hledisek prostudovat plošné textilie vytvořené za účelem ochrany lidského těla před účinky elektromagnetického pole. Ve spolupráci se společností Sintex a.s. byla vyrobena široká paleta textilií (tkanin, pletenin) tvořených přízemi obsahujícími ve své struktuře kromě konvenčního polypropylenového vlákna velmi jemná staplová nerezová ocelová vlákna, čímž bylo docíleno zvýšení elektrické vodivosti textilií při zachování ostatních vlastností kladených na materiály používané v textilním průmyslu, popř. v oděvnictví. Jednotlivé textilie se lišily jednak výší obsahu vodivé komponenty v přízi, tak různým umístěním tzv. hybridní příze v textilii, jemností použité příze, strukturou (pletenina, tkanina) a typem vazby. Veškeré vyvinuté plošné textilie byly testovány z hlediska elektrických vlastností a účinnosti elektromagnetického stínění. Jelikož byly textilie určené pro oděvní účely, byl dále studován vliv údržby (praní) na stínící účinnost a hodnoceny vybrané charakteristiky související s komfortem nošení a opotřebením.

Za účelem studia výše elektrické vodivosti byly textilie byly hodnoceny z hlediska jejich povrchové a objemové rezistivity. Byl studován vliv vodivé komponenty spolu s perkolačními prahy a vliv umístění tzv. hybridní příze v textilii na výsledné elektrické vlastnosti. Na základě provedených experimentů se ukázalo, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty (nerezového ocelového vlákna) ve vzorku klesá jak povrchová, tak objemová rezistivita, resp. zvyšuje se elektrická vodivost, přičemž zvýšení obsahu kovového vlákna z 1 % na 10 % zapříčiní pokles rezistivity o 3 řády. Při dalším zvýšení koncentrace vodivé komponenty na 75 % poklesne rezistivita o 6, resp. 4 řády pro povrchovou resp. objemovou rezistivitu. Perkolační práh, který charakterizuje kritický obsah vodivé komponenty, při kterém se chování materiálu začne blížit elektrickému vodiči, byl u tkaných vzorků tvořených zcela hybridními přízemi (skupina vzorků 1) pozorován v oblasti 3 - 5 %. Při zvyšování koncentrace vodivé komponenty nad 60 % již nedocházelo k výraznému poklesu rezistivity. Závislost objemové i povrchové rezistivity na obsahu kovového vlákna ve vzorku (v oblasti nad perkolačním prahem) lze aproximovat pomocí mocninné funkce převzaté z literatury. Navržený vztah je možno použít pro odhad výše elektrické vodivosti textilie při daném obsahu vodivé komponenty.

Obdobné chování elektrické vodivosti v závislosti na obsahu vodivé komponenty bylo pozorováno také u pletených vzorků (skupiny 4). Pleteniny však v porovnání s tkaninami dosahují nižší vodivosti, což je způsobeno použitím jemnějších přízí, nižší plošnou hmotností pletenin a celkově nižším obsahem vodivé komponenty na jednotku plochy i objemu pletených vzorků.

Uspokojivých výsledků výše elektrické vodivosti bylo dosaženo při použití hybridní příze pouze jako tzv. vodivé mřížky ve tkanině. Matrici v tomto případě tvoří nevodivá bavlněná příze. I zde je možno pozorovat pokles elektrické rezistivity se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty v přízi tvořící mřížku (skupina vzorků 3). I v tomto případě je možno závislost aproximovat pomocí mocninné funkce. Výsledky ukázaly, že se zvyšující se roztečí hybridní příze v osnově a útku při zachování konstantního obsahu nerezového ocelového vlákna v přízi (skupina vzorků 2) se elektrická vodivost tkaniny snižuje. Závislost je možno aproximovat pomocí lineární funkce.

U veškerých vyvinutých textilií byla hodnocena také elektromagnetická stínící účinnost (SE), a to pomocí přerušného koaxiálního vedení dle americké normy ASTM D4935.

Dle této metodiky lze hodnotit efektivitu stínění na frekvenčním pásmu od 30 MHz do 1.5 GHz. Byla studována frekvenční závislost stínící účinnosti, vliv obsahu vodivé komponenty, vliv počtu vrstev, vliv velikosti vodivé mřížky a vliv struktury na celkovou stínící účinnost.

Bylo zjištěno, že závislost stínící účinnosti na frekvenci tkaných vzorků lze aproximovat pomocí zobecněné logaritmické funkce převzaté z literatury. Tato funkce byla následně využita pro predikci stínící účinnosti mimo měřené frekvenční rozmezí. Z prostudovaných frekvenčních závislostí stínící účinnosti je zřejmé, že efektivita stínění je funkcí rostoucí a vrůstá s rostoucím obsahem vodivé složky ve vzorku, přičemž vzorek s nejvyšším obsahem nerezového ocelového vlákna (75 %) dosahuje nejvyšší stínící účinnosti v celém frekvenčním pásmu (více jak 50 dB pro frekvenci vyšší jak 1.5 GHz). Byl potvrzen předpoklad, že nejvyšší stínící účinnosti dosahují vzorky skupiny 1, tedy vzorky, které jsou tvořeny 100 % hybridní příze. Již při použití 3 % vodivé komponenty ve vzorku dosahuje textile stínící účinnosti nad 20 dB pro frekvenci 1.5 GHz a vyšší, což překračuje požadavky na textile textile odolné vůči elektromagnetickému záření pro obecné použití.

Uspokojivé stínící účinnosti bylo dosaženo použitím pouze tzv. vodivé mřížky v textili, což výrazně snižuje výrobní náklady výrobku. Při vytvoření vodivé mřížky hybridní přízi s obsahem vodivé komponenty 15 % v nevodivé matici dosahuje tkanina stínící účinnosti překračující 12 dB pro frekvence rovné a vyšší než 1.5 GHz.

Výrazně nižší bariérní schopnost vůči elektromagnetickému záření byla pozorována u pletených vzorků v porovnání se vzorky tkanými. Pro dosažení stínící účinnosti kolem 10 dB pro frekvenční pásmo 1 - 1.5 GHz je nutno použít pleteninu obsahující min. 15 % vodivé komponenty. Tento jev je v souladu s porovnáním elektrických vlastností vyvinutých tkanin a pletenin a je zapříčiněn použitím jemnější příze a nižší plošné hmotnosti pleteného vzorku v porovnání s tkaným. Modifikací struktury pleteniny, tedy vazby, lze dosáhnout vyšší stínící účinnosti textilního materiálu.

Jak bylo zmíněno výše, obsah vodivé komponenty ve vzorku má výrazný vliv na výslednou stínící schopnost textilní struktury. Již při zvýšení obsahu vodivé komponenty na 1 % dosahuje tkanina (skupina vzorků 1) SE 17 dB při frekvenci 1.5 GHz. Závislost SE na obsahu vodivé komponenty je možno aproximovat mocninou funkcí. Perkolační práh se pohybuje v oblasti 3 - 5 %, což je v souladu s hodnocením elektrické vodivosti. Bylo zjištěno, že závislost stínící účinnosti na koncentraci kovového vlákna (P) v oblasti nad perkolačním prahem lze aproximovat lineární funkcí. Totožné chování (lineární závislost SE na P v oblasti nad perkolačním prahem) bylo pozorováno u vzorků skupiny 3, tedy vzorků obsahujících různě vodivou mřížku ve své struktuře.

Získané regresní modely je možno využít pro predikci a následnou optimalizaci obsahu vodivé komponenty za účelem získání výrobku s dostatečnou stínící účinností. Optimalizace obsahu vodivé složky v přízi/ plošné textili je nutná nejen kvůli finanční nákladnosti použitého materiálu, ale také s ohledem na opotřebení strojního zařízení při zpracování materiálu obsahujícího příměs kovového vlákna.

Žádoucí výše elektromagnetické stínící účinnosti je odvislá zejména od účelu použití výrobku. Rozlišovat je nutno výrobky pro profesionální využití, kde se předpokládá vyšší výkonová hustota zdroje elektromagnetického záření a delší čas expozice. Na vý-

robky pro tento typ využití jsou kladeny vyšší nároky, průměrná ochrana předpokládá stínící účinnost výrobku 30 - 40 dB (odpovídající útlumu elektromagnetické vlny o 99.9 - 99.99 %). Požadovaná stínící účinnost na oděvy pro obecné použití (oděvy pro každodenní nošení) splňující průměrný stupeň ochrany se pohybuje v oblasti 7 až 10 dB (tj. útlum elektromagnetické vlny o 80 - 90 %).

Bylo zjištěno, že zvýšením počtu vrstev dochází ke zvýšení stínící účinnosti tzv. sendviče, a to lineárně. Stejný efekt má snížení rozteče hybridních přízí tvořících tzv. vodivou mřížku v nevodivé matrici, tzn. snížením rozteče vodivé příze v osnově a útku dochází k vyšší koncentraci vodivé komponenty objemu i ploše textilie, což způsobuje vrůst stínící schopnosti vzorku.

Z provedených experimentů lze shrnout, že praní má vliv jak na elektrickou vodivost, tak na stínící efektivitu vzorků, což bylo potvrzeno jak pro vzorky pletené, tak tkané. U vzorků tkaných obsahujících 15 % vodivé komponenty došlo k poklesu stínící účinnosti po aplikaci 20 pracích cyklů o cca 3 dB oproti referenčnímu vzorku, který dosahoval průměrné SE 30 dB pro frekvenční pásmo 600 MHz - 1.5 GHz. U pletenin (studován vzorek obsahující 15 % kovového vlákna) byl pozorován velmi nízký vliv praní na výslednou stínící schopnost. Pro některé frekvence dokonce nebyl prokázán. Žmolovitost po praní se projevila zejména u pletených vzorků, u tkaných vzorků nejsou ani po 20 pracích cyklech žmolky patrné.

Z hlediska vybraných charakteristik souvisejících s komfortem nošení a opotřebením lze sumarizovat pro tkané vzorky následující. Tepelná vodivost a tepelná jímavost vzorků vrůstá se zvyšující se koncentrací vodivého vlákna ve struktuře textilie, a to díky úzké souvislosti mezi tepelnou a elektrickou vodivostí. Byla pozorována zvyšující se paropropustnost (doprovázená poklesem výparného odporu) a prodyšnost při vrůstu obsahu vodivé komponenty ve struktuře textilie, což bylo zapříčiněno nižším zakrytím textilií obsahujících vyšší obsah kovového vlákna. Zvýšením obsahu nerezového ocelového vlákna došlo ke snížení tuhosti, resp. ohybového momentu, čímž byla způsobena vyšší mačkovost a došlo ke zvýšení splývavosti vzorku. Odolnost v oděru se zvýšením obsahu velmi jemných kovových vláken snižuje, avšak cca do 20 % vodivé komponenty je odolnost v oděru vzorku určeného pro oděvní účely uspokojivá.

Dílič výsledky práce byly publikovány v odborných časopisech a ve sbornících mezinárodních konferencích [75, 77, 79, 83, 101, 102, 109, 114].

6.3 Experimentální ověření nového zařízení pro měření elektromagnetické stínící účinnosti textilních vzorků

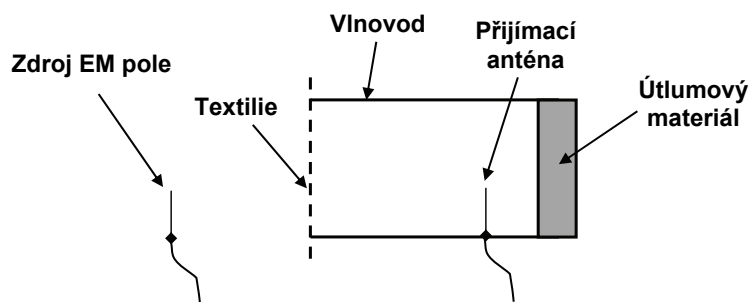
Je zřejmé, že zatímco velikost elektromagnetické stínící účinnosti kovových krytů je možno stanovit na základě jejich elektrických, resp. magnetických vlastností, efektivitu stínění vzorků s komplexnější strukturou a často heterogenním složením, jejichž představiteli jsou právě textilní materiály, je třeba určit měřením.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.4, v současné době se využívá několika měřících metod, avšak pro plošné útvary dosahující omezených rozměrů (cca 100 cm²) není k dispozici norma, jež by ošetřovala jejich hodnocení z hlediska stínící účinnosti.

Za účelem možnosti hodnocení stínící účinnosti vzorků omezených rozměrů bez nutnosti časově náročné přípravy vzorků pro měření byla vyvinuta v průběhu řešení disertační práce měřící metoda nazvaná Metoda stíněného vlnovodu, přičemž se jedná o modifikovanou metodu stíněné schránky.

Nově navržené zařízení se skládá z kovového vlnovodu obdélníkového průřezu, uvnitř kterého je umístěna přijímací anténa. Na vstup vlnovodu se umísťuje měřený vzorek, výstup vlnovodu je opatřen vysoce absorpčním materiálem, který zabraňuje odrazu prošlé vlny zpět k přijímací anténě. Vně vlnovodu je umístěn zdroj elektromagnetického záření. Rozměry vlnovodu musí být dimenzovány dle požadované frekvence tak, aby vlna vstupující do vlnovodu měla specifické vlastnosti (postupná vlna s jedním maximem), tzn. pro úzké frekvenční pásmo je třeba použití vlnovodu odpovídajících rozměrů. Stanovení elektromagnetické stínící účinnosti se provádí na základě měření útlumu výkonové hustoty elektromagnetické vlny v materiálu.

Měřící procedura jejíž cílem je stanovení stínící účinnosti materiálu se skládá ze dvou kroků. Nejprve je provedeno referenční měření a zaznamenána výkonová hustota uvnitř vlnovodu bez přítomnosti textilního materiálu na jeho vstupu. V druhém kroku je umístěn měřený materiál na vstup vlnovodu a opět zaznamenána výkonová hustota uvnitř vlnovodu. Obě měření musí být provedena za stejných podmínek (klimatické, geometrické - pozice antén). Schéma navrženého zařízení je uvedeno na obr. 6.40. Více informací o nově navrženém měřícím zařízení je možno nalézt v kapitole 6.3.



Obrázek 6.40: Jednoduché schéma navrženého měřícího zařízení.

Tabulka 6.30: Základní vlastnosti studovaných vzorků skupiny č. 1.

Označení	Složení	Vazba	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Tloušťka vzorku [mm]
T1	99%PP/1%SS	Kepr 2/2	233.5	0.78
T3	97%PP/3%SS	Kepr 2/2	225.1	0.75
T5	95%PP/5%SS	Kepr 2/2	209.0	0.77
T10	90%PP/10%SS	Kepr 2/2	221.0	0.75
T15	85%PP/15%SS	Kepr 2/2	217.7	0.73
T20	80%PP/20%SS	Kepr 2/2	208.8	0.71

6.3.1 Studované materiály

Pro ověření navrženého měřícího zařízení bylo vybráno 6 plošných textilií již představených v kapitole 6.2. Jedná se o tkané vzorky skupiny č. 1 stejné struktury lišících se obsahem kovové složky (velmi jemného nerezového ocelového vlákna). Souhrn vzorků použitých pro ověření funkčnosti nového zařízení je uveden v tabulce 6.30.

6.3.2 Hodnocení stínící účinnosti

Za účelem ověření vhodnosti použití nově navržené metodiky a zařízení byly experimentálně získané výsledky měření sady vzorků pomocí vlnovodné metody porovnány s totožným měřením provedeným pomocí metody přerušného koaxiálního vedení dle ASTM D4935-99. Tato metoda byla použita jako standard zejména vzhledem k tomu, že je v současné době pro hodnocení stínící účinnosti textilních materiálů ve světě nejpoužívanější.

Metoda měření efektivity elektromagnetického stínění pomocí přerušného koaxiálního vedení pracuje s předpokladem dopadu rovinné vlny na stínící přepážku v blízké zóně elektromagnetického pole pro frekvenci 30 MHz až 1.5 GHz. Měřící přípravek sestával z držáku vzorku koaxiálního tvaru (výrobce Electro-Metrics, Inc., model EM-2107A), jehož vstup a výstup byl připojen k obvodovému analyzátoru. Pro generování a přijímání elektromagnetického signálu byl použit obvodový analyzátor Rhode & Schwarz ZNC3. Měřící procedura spolu s následným vyhodnocením naměřených dat je popsána v kapitole 6.2.3.

Vlnovod s obdélníkovým průřezem specifických rozměrů byl využit pro ověření navržené metodiky měření stínící účinnosti při frekvenci 1.8 GHz. Analyzátor Agilent E4991A byl použit pro generování a vysokofrekvenční analyzátor HF-38B (Gigahertz Solution) pro příjem elektromagnetického signálu.

Jak uvádí norma americké společnosti ASTM D4935-99, měřením pomocí přerušného koaxiálního vedení je možno hodnotit elektromagnetickou stínící účinnost při maximální frekvenci 1.5 GHz. Aby bylo možno porovnat výsledná data získaná oběma měřícími přístupy, byla využita extrapolace křivek získaných měření pomocí přerušného koaxiálního vedení (pro frekvenci 30 MHz - 1.5 GHz) do oblasti 1.8 GHz. Samotné měření účinnosti elektromagnetického stínění bylo provedeno na 5, resp. 12 odlišných místech vzorků pomocí přerušného koaxiálního vedení, resp. vlnovodného přístup z důvodu následné statistické analýzy.

Pro objektivní porovnání, zda se rozdíly mezi průměrnými hodnotami naměřených dat získanými oběma měřicími metodami signifikantně liší (nebo jsou způsobené náhodnou chybou) byla provedena statistická analýza naměřených dat využívající dvouvýběrový t -test (hladina významnosti $\alpha = 0.05$). Nulová hypotéza předpokládá „nulový rozdíl mezi průměrnými hodnotami obou výběrů“, tedy

$$H_0 : \mu_w = \mu_c, \quad (6.19)$$

tzp. že střední hodnota SE měřená vlnovodným přístupem (μ_w) se rovná střední hodnotě SE měřené pomocí přerušného koaxiálního vedení μ_c . Alternativní hypotéza je

$$H_1 : \mu_w \neq \mu_c. \quad (6.20)$$

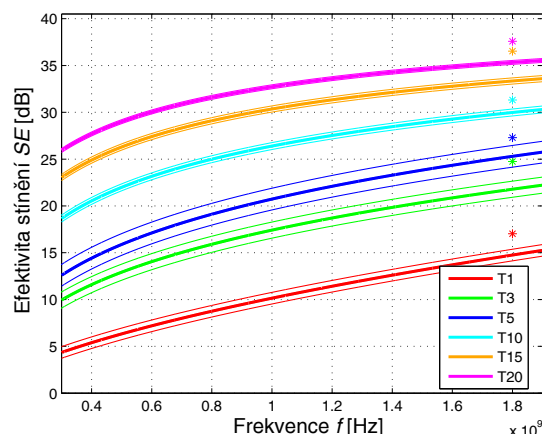
Průzkumová analýza dat byla provedena pro každou sadu měření jednotlivých vzorků před samotným statistickým testováním hypotéz. Bylo zjištěno, že jednotlivé výběry pochází ze základního souboru s normálním rozdělením, prvky jsou nezávislé a výběry jsou homogenní. V dalším kroku bylo zrealizováno ověření shody rozptylů Fisher-Snedecorovým F -testem. Na závěr byl aplikován test shody středních hodnot Studentův t -test. Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky, 95% intervaly spolehlivosti pro střední hodnotu a p -hodnoty F -testu a t -testu pro výsledky měření stínící účinnosti veškerých vzorků získaných nově navrženou a porovnávací metodou jsou shrnuty v tabulce 6.31.

Tabulka 6.31: Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky, 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty a p -hodnoty F -testu a t -testu komparativního porovnání obou metod.

Vzorek	T1	T3	T5	T10	T15	T20
Vlnovodný přístup (navrhovaný)						
\bar{x}	17.03	24.74	27.29	31.32	36.54	37.59
s	4.57	4.51	3.55	4.56	4.26	3.89
95% IS	2.59	2.55	2.10	2.69	1.97	2.41
Metoda přerušného koaxiálního vedení (porovnávací)						
\bar{x}	14.42	21.94	25.08	29.65	33.65	35.61
s	0.62	1.61	0.42	0.80	0.27	0.46
95% IS	0.54	1.01	0.37	0.7	0.24	0.40
F-test						
p-hodnota	0.002	0.018	0.001	0.004	0.000	0.001
t-test						
p-hodnota	0.077	0.066	0.057	0.243	0.061	0.109

6.3.3 Výsledky a diskuse

Na obrázku 6.41 jsou zobrazeny závislosti SE na frekvenci (spojité čáry) získané měřením pomocí koaxiálního přístupu spolu s 95% intervaly spolehlivosti. Aproximace naměřených dat byla provedena zobecněnou logaritmickou funkcí dle (6.13). Pomocí extrapolace byly získány hodnoty SE mimo měřený frekvenční rozsah tak, aby mohlo

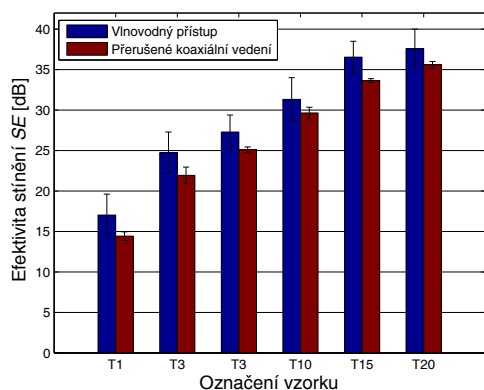


Obrázek 6.41: Závislost SE na frekvenci měřená přerušeným koaxiálním vedením dle ASTM D4935-99 (spojitá čára), body představují měření SE realizované navrženým vlnovodným přístupem při frekvenci 1.8 GHz.

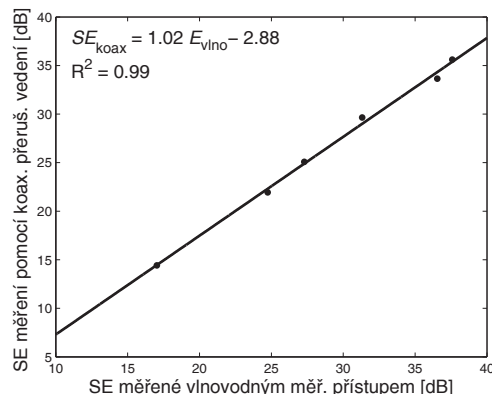
být provedeno porovnání s nově navrženou metodou měření. Body označené hvězdičkou představují měření získaná navrženým vlnovodným přístupem.

Z provedené průzkumové analýzy lze pozorovat, že střední hodnoty získané pomocí vlnovodného měřicího přístupu jsou u všech vzorků vyšší než hodnoty získané s využitím ASTM D4935-99, tedy koaxiálním přerušeným vedením. Předpoklad shody rozptylů byl na základě Fisher-Snedecorova F -testu zamítnut. Je možno si povšimnout, že směrodatná odchylka, která určuje jak výrazně jsou hodnoty rozptýleny od průměrné hodnoty, je vyšší v případě měření navrženým vlnovodným přístupem při porovnání variability měření obou metod. Test shody středních hodnot ukázal, že střední hodnoty získané oběma měřicími metodami jsou v dobré shodě. To znamená, že na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ nezamítáme nulovou hypotézu, protože p -hodnota stanovená v tabulce 6.31 představuje nejnižší možnou hladinu významnosti (určenou na základě hodnoty testovacího kritéria), při které je možno ještě nulovou hypotézu. Veškeré testové statistiky indikují statisticky nevýznamný rozdíl μ_w a μ_c na zvolené hladině významnosti. Tento fakt vhodně ilustruje obr. 6.42(a), na kterém jsou zobrazeny střední hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti efektivit stínění měřené pomocí navržené a porovnávací metody. Empirický Q-Q graf průměrných hodnot stínící účinnosti (obr. 6.42(b)) pro oba výběry ukazuje výraznou shodu rozdělení potvrzenou lineárním průběhem. Regresní přímka má směrnici 1.018, úsek -2.88 a korelační koeficient $r = 0.9983$. Z uvedeného je zřejmý posun hodnot SE získaných vlnovodným měřicím přístupem o cca 2.9 dB oproti datům měřeným pomocí přerušného koaxiálního vedení.

Vhodnost použití nově navrženého měřicího zařízení byla potvrzena pomocí dvouvýběrového t -testu aplikovaného na šesti různých textilních vzorcích. Měření prováděné pomocí vyvinuté vlnovodné metody je v porovnání s metodou koaxiálního přerušného vedení mnohem rychlejší, měřené vzorky mají relativně nízký rozměr (v závislosti na frekvenci) a odpadá nutnost přípravy vzorků speciálních rozměrů. Jednou podmínkou je, že vzorek musí být dostatečně velký, aby byl překryt vstup vlnovodu. Výrobní náklady na vlnovod jsou poměrně nízké a jeho konstrukce je jednoduchá. Nevýhodou je možno spatřit ve skutečnosti, že pro měření velmi úzkého frekvenčního pásma je třeba disponovat vlnovodem specifických rozměrů.



(a)



(b)

Obrázek 6.42: (a) Porovnání středních hodnot účinnosti elektromagnetického stínění měřených oběma metodami (navržená a porovnávací) spolu s 95% intervaly spolehlivosti, (b) empirický graf Q-Q.

6.3.4 Shrnutí

Za účelem možnosti hodnocení stínící účinnosti vzorků omezených rozměrů bez nutnosti časové přípravy vzorků pro měření byla v průběhu řešení disertační práce vyvinuta měřící metodika nazvaná Metoda stíněného vlnovodu, přičemž se jedná o modifikovanou metodu stíněné schránky. V rámci této podkapitoly byla pomocí komparativní studie ověřena způsobilost tohoto nově vyvinutého zařízení. Experimentálně získané výsledky měření sady šesti textilních vzorků pomocí nově navržené vlnovodné metody byly porovnány s totožným měřením realizovaným pomocí metody přerušného koaxiálního vedení dle ASTM D4935-99 za využití dvouvýběrového t -testu.

Test shody středních hodnot ukázal, že střední hodnoty všech měřených vzorků získané oběma měřicími metodami jsou v dobré shodě na hladině významnosti $\alpha = 0.05$. Předpoklad shody rozptylů byl zamítnut, variabilita dat je vyšší v případě měření navrženým vlnovodným přístupem při porovnání obou metod. Z provedené průzkumové analýzy lze pozorovat, že střední hodnoty získané pomocí vlnovodného měřicího přístupu jsou u všech vzorků vyšší než hodnoty získané s využitím ASTM D4935-99, rozdíl činí cca 3 dB.

Podařilo se prokázat shodu měření nově navrženého vlnovodného měřicího zařízení se zařízením normovaným (v současnosti ve světě nejpopulárnějším), a to na šesti textilních vzorcích s využitím statistické analýzy naměřených dat. Výhody nové metodiky lze spatřit v rychlosti měření, možnosti měření vzorků malých rozměrů, nenáročné přípravě vzorků a nízkých pořizovacích nákladech na přístrojové vybavení. Jedinou nevýhodu představuje skutečnost, že pro měření velmi úzkého frekvenčního pásma je třeba pro měření využít vlnovodu specifických rozměrů.

Dílí výsledky práce byly publikovány ve sbornících mezinárodních konferencí [96, 97].

6.4 Porovnání různých měřících metod používaných pro hodnocení stínící účinnosti

Z provedeného literárního průzkumu vyplývá, že se výsledky měřeného parametru účinnosti elektromagnetického stínění (SE) různými metodami velmi odlišují, zejména při použití přístrojů založených na odlišných fyzikálních principech. Cílem této kapitoly bylo na základě experimentálních pokusů prozkoumat, jaký vliv má použitá metoda na výsledné hodnoty účinnosti elektromagnetického stínění (SE) a prakticky zhodnotit výhody a nevýhody jednotlivých zařízení. Totožná sada textilních vzorků se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu byla hodnocena pomocí různých přístrojů, které jsou v současné době běžně využívány.

Elektromagnetická stínící účinnost vybraných textilních vzorků byla proměřena pěti různými metodami. Mezi vyzkoušené metody patří metoda přerušného koaxiálního vedení dle ASTM D4935-99 aplikovaná na třech odlišných pracovištích - na turecké univerzitě Marmara University, na Fakultě elektronické ČVUT a na Fakultě textilní TUL. Mezi testované měřící metody dále patří modifikovaná metoda koaxiálního přerušného vedení vhodná pro hodnocení vzorků velmi malých rozměrů, metoda stíněného prostoru dle EN 61000-5-7 realizovaná na certifikovaném pracovišti VOP CZ, s.p. Šternberk, metoda bezodrazové komory dle EN 50147-1 a metoda stíněného vlnovodu vyvinutá v rámci disertační práce.

Je zřejmé, že každá z vedených metod skýtá určité výhody a nevýhody. Např. metoda koaxiálního přerušného vedení (ASTM D4935) je v současné době nejpoužívanější metodou, měření může být realizováno na specifickém frekvenčním pásmu (30 MHz až 1.5 GHz) a výsledky získané z různých laboratoří by měly být porovnatelné [50]. Měřené vzorky mají rozměr cca 12x12 cm, avšak jejich příprava do požadovaného tvaru je relativně časově náročná. Modifikované zařízení založené na principu přerušného koaxiálního vedení liší se oproti normovanému zařízení menším průměrem vedení bylo testováno také v průběhu řešení práce. Toto zařízení je vhodné pro měření vzorků omezených rozměrů - cca 3x3 cm, i zde je nutná příprava vzorků do požadovaných rozměrů. Zmenšením geometrie koaxiálního vedení bylo docíleno možnosti měření na širším frekvenčním pásmu a možnosti hodnocení odolnosti vůči elektromagnetickému smogu vzorků omezených rozměrů vyrobených laboratorně (uhlíkové nanotrubičky, elektro depozice kovů, vodivých polymerů atd.). Postup měření je ve shodě s normou, tzn. využití referenčního a měřeného vzorku. Norma MIL-STD-285, IEEE-STD-200 a pozdější normy (např. EN 61000-5-7) jsou založeny na metodě stíněného prostoru. Jejich nevýhodou je však nutnost použití vzorků o ploše min. 2.5 m². Zdroj elektromagnetického záření je obvykle umístěn vně stíněného prostoru a měřená frekvenční oblast se pohybuje v rozmezí 100 kHz až 10 GHz. Předpokládá se [50], že výsledky získané v různých laboratořích se mohou odlišovat dokonce až v řádu několika dB, což způsobuje otvor ve stíněné stěně (do kterého se upíná měřený vzorek), který sám o sobě tvoří typ antény s parametry závisujícími na několika faktorech, mezi které patří např. rozměr otvoru. Měření založené na obdobném principu poskytuje metoda využívající bezodrazovou komoru. I v tomto případě jsou využívány dvě bezodrazové místnosti oddělené přepážkou s otvorem, do kterého se upíná vzorek. I v tomto případě je možno obecně měřit stínící účinnost na relativně širokém frekvenčním pásmu v rozmezí cca od 30 MHz - 9.9 GHz [29]. Také měření jednoduchým vlnovodným principem vyvinutým

a otestovaným v rámci práce bylo zahrnuto do porovnání různých metod. Jak bylo uvedeno v předešlých kapitolách, v tomto případě odpadá jakákoliv příprava vzorků. Velkou nevýhodu však představuje nutnost použití vlnovodu specifických rozměrů pro hodnocení stínící účinnosti při konkrétní frekvenci. Více informací o jednotlivých metodách měření elektromagnetické stínící účinnosti je uvedeno v kapitole 4.4.

6.4.1 Studované materiály

Pro porovnání různých přístupů hodnocení SE bylo vybráno 5 odlišných typů textilií již představených v kapitole 6.2. Jedná se jak o tkané vzorky skupiny č. 1 stejné struktury lišících se obsahem kovové složky (velmi jemného nerezového ocelového vlákna), tak o pletený vzorek skupiny č. 4. Pletený vzorek byl do studie zahrnut zejména kvůli své odlišné struktuře (anizotropie ve směru řádku a sloupku) v porovnání se vzorky tkanými, které vykazují téměř izotropní chování ve směru osnovy a útku s ohledem na geometrické vlastnosti. Jak bylo uvedeno výše, pro měření pomocí stíněného prostoru (EN 61000-5-7) je nutné disponovat vzorky o ploše okolo 2.5 m², což splňovala pouze sada pletených vzorků vytvořená na okrouhlém pletacím stroji. Tkané vzorky byly vytvořeny v šíři cca 45 cm, což nebylo pro měření pomocí stíněného prostoru dostačující. Souhrn vzorků použitých pro komparativní studii měřících přístupů je uveden v tabulce 6.31.

Tabulka 6.32: Základní vlastnosti studovaných vzorků.

Označení	Složení	Vazba	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Tloušťka vzorku [mm]
T1	99%PP/1%SS	Kepr 2/2	233.5	0.78
T3	97%PP/3%SS	Kepr 2/2	225.1	0.75
T5	95%PP/5%SS	Kepr 2/2	209.0	0.77
T20	80%PP/20%SS	Kepr 2/2	208.8	0.71
P20	80%PP/20%SS	Pletenina	156.23	0.64

6.4.2 Hodnocení SE pomocí různých měřících přístupů

Hodnocení stínící účinnosti bylo uskutečněno pomocí následujících metodik na uvedených pracovištích:

- ASTM D4935-99 - metoda přerušného koaxiálního vedení
 - Marmara University v Turecku
 - Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
 - Fakulta textilní TUL
- modifikovaná ASTM D4935
- EN 61000-5-7 - metoda stíněného prostoru
- EN 50147-1 - metoda bezodrazové komory (Ege University Turecko)
- vlnovodný přístup vyvinutý v rámci práce

Při měření pomocí ASTM D4935-99 bylo využito koaxiálního přerušného vedení popsaného v normě. Na pracovišti TUL a Marmara University bylo využito komerčně vyráběného koaxiálního vedení dodávaného společností Electro-Metrics, corp. typ EM-2107A, který je výrobcem přímo určený pro použití dle dané normy. V případě měření na pracovišti ČVUT v Praze bylo využito koaxiálního vedení nekomerčního typu vytvořeného na pracovišti pro dané účely.

Modifikovaná metoda ASTM D4935 se liší oproti původní normě pouze průměrem koaxiálního vedení ($d = 3$ cm). Měření bylo realizováno pro frekvenci 800 MHz - 2.5 GHz s krokem 100 MHz.

V případě využití metody stíněného prostoru bylo pracováno na frekvenci 100 MHz až 1000 MHz s krokem 20 MHz. Pro buzení i měření elektromagnetického pole byla použita logaritmicko-periodická anténa. Vzdálenost mezi anténami byla 1 m. Měření bylo provedeno při vertikální i horizontální polarizaci antény vzhledem k zemní rovině zkušební komory (orientace A a B). Zkušební okno mělo rozměr 1x1 m.

Měření pomocí bezodrazové komory bylo realizováno na specializovaném pracovišti Marmara University v Turecku. Zkušební okno, do kterého se upíná vzorek mělo rozměr 30x30 cm a měření bylo prováděno na frekvenci 100 MHz až 1 GHz s krokem 100 MHz. I v tomto případě byla použita logaritmicko-periodická anténa a měření prováděno při horizontální i vertikální orientaci vzorku vzhledem k zemní rovině zkušební komory.

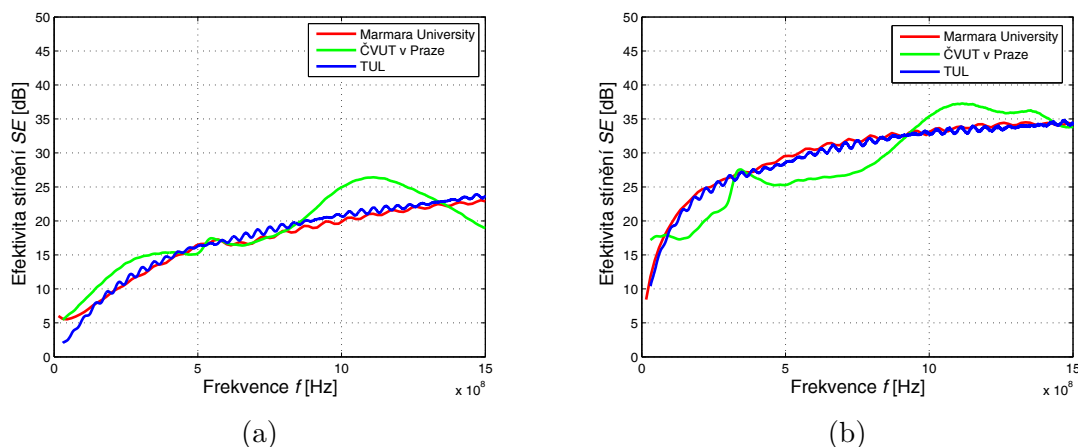
Měření pomocí stíněného vlnovodu bylo realizováno na frekvenci $f = 1.8$ GHz.

Pro veškeré měřicí přístupy byl testován vliv orientace vzorku na výslednou elektromagnetickou stínící účinnost.

6.4.3 Výsledky a diskuse

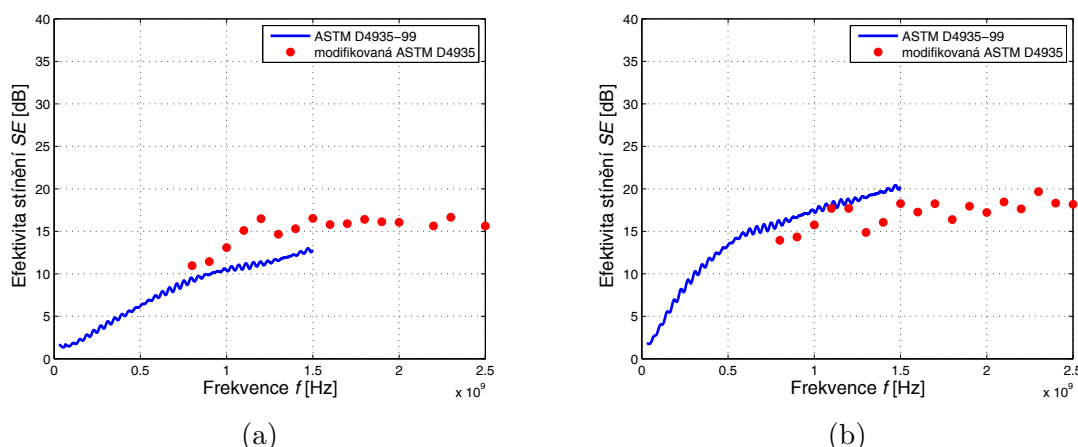
Porovnání naměřených hodnot stínící účinnosti dle normy ASTM D4935-99 na různých pracovištích a různých vzorcích (T5, T20) je zobrazeno na obr. 6.43. Bylo potvrzeno, že obsah kovové složky má výrazný vliv na výslednou SE, se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty vzrůstá schopnost vzorku stínit EM pole. Je možno si povšimnout, že měření realizovaná na univerzitě v Turecku a na TUL jsou v dobré shodě. Oproti tomu, měření realizovaná na ČVUT v Praze se i při použití totožné normy a obdobného přístrojového vybavení liší. Tento jev může být zapříčiněn použitím rozdílné měřicí hlavice (koaxiálního vedení). Na frekvenční závislosti vzorků měřených pomocí přerušného koaxiálního vedení ČVUT je možno pozorovat lokální maxima, jejichž vznik zřejmě způsobuje samotná měřicí hlavice. Frekvenční závislost měřená na turecké univerzitě i TUL má hladký průběh bez přítomnosti nevysvětlitelných skoků či lokálních maxim potvrzující předpokládaný logaritmický vrůst SE s rostoucí frekvencí. Pro tkané vzorky měřené metodou přerušného vedení nebyl potvrzen vliv různé orientace vzorku v měřicí hlavici. Pro další porovnání bude bráno jako standard měření přerušným koaxiálním vedením realizované na TUL.

Na obrázku 6.44 jsou zobrazeny závislosti naměřené efektivity elektromagnetického stínění na frekvenci – porovnání měřících přípravků přímo dle ASTM D4935-99 (TUL) s koaxiálním přípravkem upraveným pro měření vzorků malých rozměrů. Dosažené výsledky pomocí upraveného adaptéru jsou v poměrně dobré shodě s daty naměřenými



Obrázek 6.43: Závislost SE na frekvenci měřená pomocí ASTM D4935-99 na třech různých pracovištích vzorku (a) T5, (b) T20.

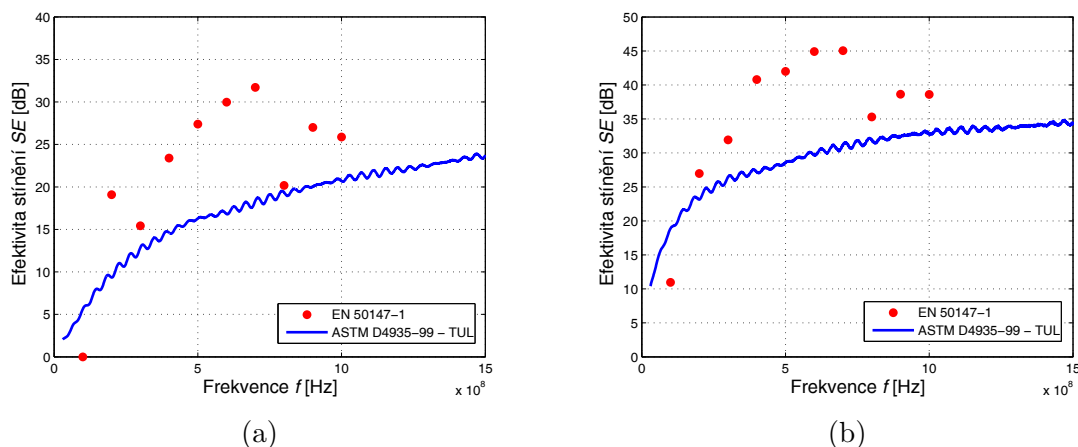
pomocí zmíněné normy a originálního adaptéru. I v tomto případě je potvrzen vrůst SE se vzrůstající frekvencí a vyvrácen vliv orientace tkaného vzorku v koaxiálním vedení.



Obrázek 6.44: Závislost účinnosti elektromagnetického stínění na frekvenci měřená pomocí modifikovaného koaxiálního přerušného vedení v porovnání s měřením přímo dle ASTM D4935 vzorků (a) T1, (b) T3.

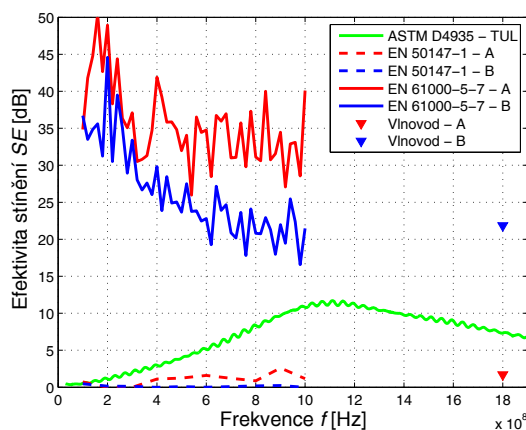
Na obrázku 6.46 je zobrazeno porovnání dat naměřených pomocí bezodrazové komory s daty získanými pomocí metody přerušného koaxiálního vedení dle ASTM D4935 na TUL pro vzorky T5 a T20. Jak je patrné z obrázku, naměřená data se zejména pro vybrané frekvence odlišují o více jak 10 dB. Z měření vyplývá závěr, že je velmi nesnadné porovnávat naměřená data stínící efektivity získaná měřícími přístupy odlišné fyzikální povahy šíření elektromagnetické vlny. I v tomto případě nebyl potvrzen vliv orientace tkaných vzorků ve zkušebním okně.

Porovnání metod stíněného prostoru, přerušného koaxiálního vedení realizovaného na TUL, bezodrazové komory a vlnovodného způsobu, jež byly aplikovány na totožný pleťový vzorek (P20) je zobrazeno na obr. 6.47. Z obrázku je zřetelně vidět významná odlišnost dat naměřených metodou stíněného prostoru a dat získaných měřením v bezodrazové komoře od dat získaných pomocí přerušného koaxiálního vedení. Výrazný rozdíl (více jak 20 dB) je také možno sledovat mezi daty získanými měřením s využí-



Obrázek 6.45: Závislost SE na frekvenci měřená pomocí bezodrazové komory v porovnání s měřením přímo dle ASTM D4935 vzorků (a) T5, (b) T20.

tím bezodrazové komory a metody stíněného prostoru, a to i přes to, že oba přístupy jsou založené na obdobném fyzikálním principu šíření elektromagnetické vlny. Rozdíl je možno přisuzovat jak rozdílné geometrické konstrukci obou komor, tak rozdílné velikosti samotného zkušebního okna. Je možno si povšimnout, že pro pleteniny, které jsou charakteristické svou anizotropní strukturou, má výrazný vliv orientace vzorku na vstupu vlnovodu (metoda stíněného vlnovodu) či ve zkušebním okně (metoda stíněného prostoru a bezodrazové komory). Potvrzuje se tak předpoklad, že výsledky parametru účinnosti elektromagnetického stínění měřeného principiálně různými metodami (rozdílné šíření EM vlny) jsou neporovnatelné.



Obrázek 6.46: Závislost SE na frekvenci měřená pomocí bezodrazové komory dle EN 50147-1, stíněného prostoru dle EN 61000-5-7, stíněného vlnovodu v porovnání s měřením realizovaným přerušným koaxiálním vedením dle ASTM D4935-99 pro vzorek P20.

6.4.4 Shrnutí

Účinnost elektromagnetického stínění textilních vzorků byla proměřena různými metodami na odlišných pracovištích za účelem prozkoumání vlivu použité metody. Experimentálně bylo ověřeno, že porovnávat hodnoty efektivity elektromagnetického stínění naměřené pomocí různých přístrojů je nesnadné, dokonce i v případě použití totožných metod, což může být způsobeno různého přístrojového vybavení.

Nejvyšší rozdíly byly pozorovány při porovnávání přístupu koaxiálního a stíněného prostoru spolu s měřením realizovaným bezodrazovou komorou, a to zejména kvůli rozdílnému šíření generované elektromagnetické vlny.

Bylo zjištěno, že v případě využití přerušného koaxiálního vedení nemá vliv orientace vzorku ve vedení na výslednou velikost stínící účinnosti, a to ani u pletenin s nesymetrickou strukturou.

Pro měření odolnosti textilních vzorků vůči elektromagnetickému smogu se zdá být jako nejvhodnější použití normované metodiky využívající přerušné koaxiální vedení s použitím komerčně vyráběné měřicí hlavy. Aplikace metody stíněného prostoru, resp. bezodrazové komory se neosvědčila zejména kvůli problémům s použitím různých typů antén pro různá frekvenční pásma, různou geometrií komor a zkušebních oken a komplikacím, které způsobuje vliv orientace vzorku ve zkušebním okně u vzorků nesymetrické struktury.

Z nabytých zkušeností a prostudovaných diskusí autorů článků publikovaných v literatuře vyplývá, že v současném stavu vědeckého vývoje neexistuje jednotná měřicí metoda, která by definovala hodnocení parametru stínící účinnosti plošných materiálů, resp. textilií. Výsledky stínící účinnosti získané použitím v současné době známých metod závisí nejen na vlastnostech stínícího materiálu, ale také na rozměrech testovaného vzorku, geometrii testovacího přípravku či parametrech zdroje elektromagnetického záření. Je zřejmé, že není vždy snadné brát v úvahu veškeré uvedené doplňkové faktory. V současnosti není k dispozici jednotná metoda, která by umožňovala porovnávání výsledků efektivity elektromagnetického stínění získaných na základě principiálně odlišných metod (např. porovnání EN 61000-5-7 s ASTM D4935). Je také možno pozorovat poptávku po obecně platných normách ošetřujících hodnocení odolnosti vůči elektromagnetickému záření plošných materiálů nekovového charakteru.

Z uvedeného vyplývá, že pro zkoumání parametrů nově vyvinutých, či modifikovaných materiálů textilního charakteru pro stínící účely, popř. komparativní studie s dalšími materiály by měla být vždy použita stejná měřicí metoda, vč. totožné geometrie. Dále je možno uvést, že pro prezentaci výzkumných úspěchů na poli materiálů se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu je vždy nutno specifikovat použitou měřicí metodu vč. geometrie a detailů jednotlivých součástí měřicí soustavy. Pouze tak je možno předejít případným nedorozuměním při porovnávání výsledků (rozdíl materiálů, vliv úpravy atd.).

Díčí výsledky práce byly publikovány v odborných časopisech a ve sbornících mezinárodních konferencích [78, 98, 100].

6.5 Možnosti predikce elektromagnetického stínění

Přímé měření účinnosti elektromagnetického stínění vyžaduje využití speciálních zařízení a jak bylo zjištěno, výsledky jsou navíc výrazně ovlivněny použitou měřicí metodou. Z teorie je známo, že pro dostatečně vysoké frekvence je dostatečné měření pouze elektrické složky elektromagnetického pole. Z tohoto důvodu byl zkoumán vztah mezi elektrickými vlastnostmi, které jsou snadno měřitelné a efektivitou elektromagnetického stínění s cílem predikovat velikost účinnosti elektromagnetického stínění na základě znalosti elektrické vodivosti materiálu.

6.5.1 Korelace mezi elektrickou vodivostí a účinností elektromagnetického stínění

Na základě rozsáhlých experimentů bylo zjištěno, že parametry účinnosti elektromagnetického stínění a elektrická rezistivita vzorků jsou statisticky závislé. Dále bylo zjištěno, že je možno rozlišit dvě oblasti. Oblast pod perkolačním prahem ($P < P_0$), tzn. oblast nízkého obsahu vodivé komponenty a oblast nad perkolačním prahem ($P > P_0$) při dostatečně vysokém obsahu vodivé komponenty. Jako nejvhodnější se jeví predikce na základě objemové rezistivity

$$SE = K_1 \ln(\rho_V) + K_2, \quad (6.21)$$

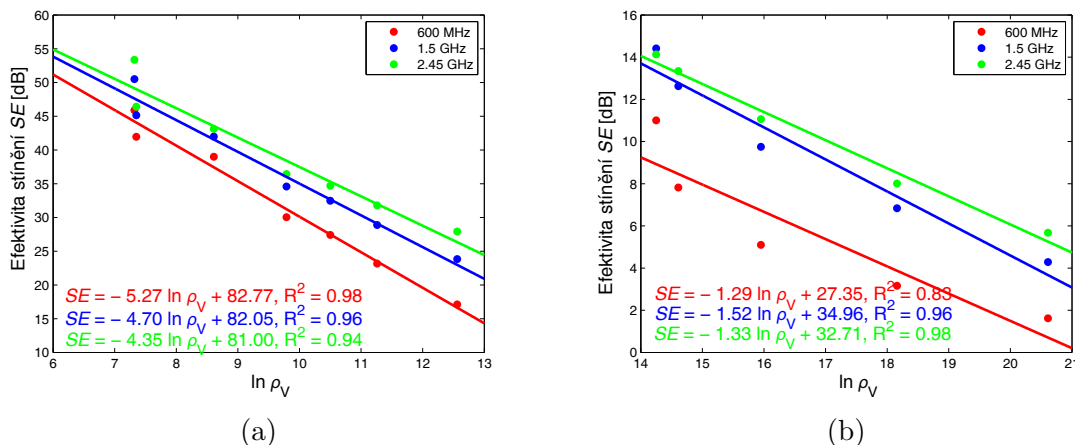
kde SE je efektivita elektromagnetického stínění [dB], ρ_V objemová rezistivita, K_1 , K_2 jsou konstanty závislé na frekvenci, na struktuře a na materiálovém složení vzorku. Tento vztah je platný zejména pro oblast obsahu vodivé komponenty nad perkolačním prahem.

Za účelem ověření korelace mezi elektrickou vodivostí, resp. objemovou rezistivitou a účinností elektromagnetického záření byly využity vzorky (skupina 1) již prostudované v kapitole 6.2 spolu s výsledky hodnocení jejich vodivosti a odolnosti vůči elektromagnetickému smogu.

Na obrázku 6.47(a) je zobrazena závislost účinnosti elektromagnetického stínění na přirozeném logaritmu objemové rezistivity pro vzorky skupiny 1 (vzorky tvořené 100 % hybridní příze s různým obsahem nerezového ocelového vlákna) obsahující koncentraci vodivé komponenty nad perkolačním prahem a tři vybrané frekvence - 600 MHz, 1.5 GHz a 2.45 GHz. Plná čára koresponduje s lineárním regresním modelem získaným metodou nejmenších čtverců. Pearsonův korelační koeficient - 0.99, -0.98, resp. -0.97 ukazuje na vysokou korelaci. Nezávisle proměnná je ve všech případech se závisle proměnnou spjata silnou lineární závislostí a ukazuje se, že navržený lineární regresní model je statisticky významný. Druhá mocnina korelačního koeficientu nazvaná koeficient determinace D vyšla 98.28, 96.89, resp. 93.43 %.

Vysoká korelace mezi účinností elektromagnetického stínění a objemovou rezistivitou byla také potvrzena pro skupinu vzorků 3, tj. vzorků obsahující vodivou mřížku tvořenou hybridní přízí s různým obsahem vodivé komponenty, viz obr. 6.47(b).

Potvrzeno bylo, že využitím navržených regresních modelů je možno predikovat účinnost elektromagnetického stínění na základě znalosti elektrických vlastností materiálu,



Obrázek 6.47: Závislost stínící účinnosti na přirozeném logaritmu objemové rezistivity pro vzorky (a) skupiny 1, (b) skupiny 3.

kteřé jsou snadno měřitelné a optimalizovat tak obsah vodivé komponenty vzhledem k požadované úrovni odolnosti vzorků vůči elektromagnetickému smogu.

6.5.2 Numerické stanovení elektromagnetické stínící účinnosti

Cílem této části práce bylo ověřit, zda je možné pro predikování hodnot stínící účinnosti textilních materiálů využít numerické vztahy doposud publikované v odborné literatuře. Tyto vztahy byly původně určeny zejména pro predikci SE pevných kompozitních materiálů a jejich souhrn je uveden v kapitole 4.6.2.

Pro ověření využitelnosti numerických modelů byla vybrána sada vzorků 1 představených v kapitole 6.2 (tkané vzorky tvořené 100 % hybridní příze obsahující odlišný obsah vodivé komponenty) a využity byly výsledné hodnoty získané uskutečněnou charakterizací vzorků dle jejich objemové rezistivity a účinnosti elektromagnetického stínění.

Na základě rozsáhlých experimentů bylo zjištěno, že z prostudovaných modelů pro výpočet účinnosti stínění vzorků tvořených 100 % hybridní příze (skupina vzorků 1 popsaná v kapitole 6.2) nejlépe vyhovuje (zejména v oblasti nad perkolačním prahem obsahu vodivé komponenty) ve své originální formě model navržený WHITEM [37]

$$SE = 168 - 10 \log \left(\frac{\sigma_c f}{\sigma} \right) + 1.315 \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_c}} f, \quad (6.22)$$

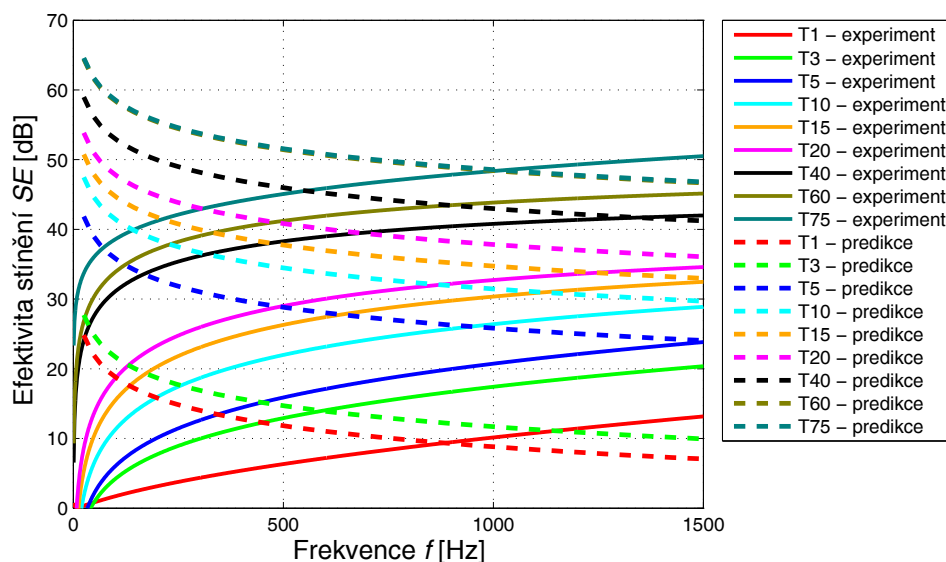
kde K [$\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$] je elektrická vodivost materiálu a f [MHz] je frekvence, K_c je vodivost mědi ($5.82\text{E}+05 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$) a t je tloušťka vzorku [cm].

V tabulce 6.28 je zobrazeno porovnání průměrných hodnot účinnosti elektromagnetického stínění včetně 95% intervalů spolehlivosti experimentálně zjištěných (ASTM D4935-99) a predikovaných dle (6.22) pro frekvenci 1.5 GHz. Z tabulky je možno pozorovat relativně dobrou shodu predikovaných hodnot SE s těmi experimentálně zjištěnými zejména u vzorků s obsahem vodivé komponenty nad perkolačním prahem (T5 - T75).

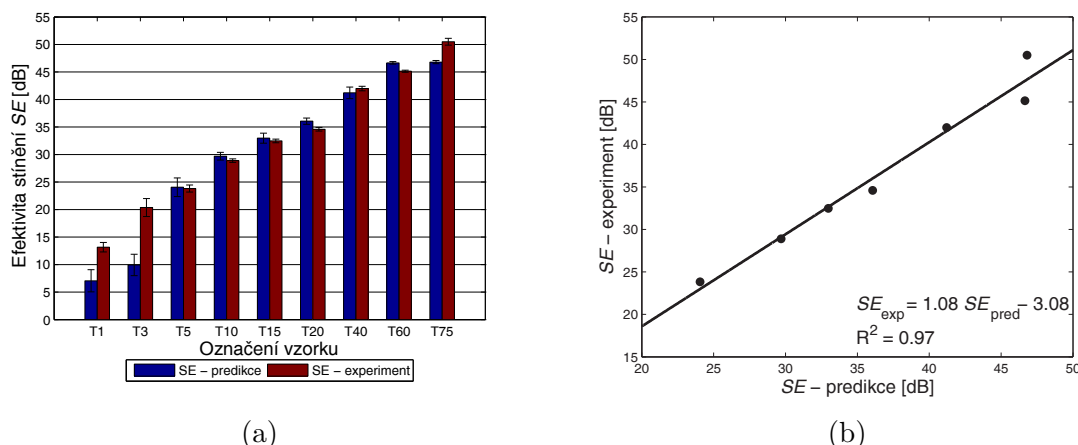
Tabulka 6.33: Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti experimentálně naměřené a predikované na základě numerického vztahu (6.22) pro tkané vzorky skupiny č. 1.

Označení	Tloušťka [mm]	SE - experiment [dB]		SE - predikce [dB]	
		\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
T1	0.78	13.16	± 0.86	7.05	± 2.02
T3	0.75	20.36	± 1.64	9.93	± 1.95
T5	0.77	23.83	± 0.64	24.06	± 1.70
T10	0.75	28.89	± 0.32	29.69	± 0.71
T15	0.73	32.47	± 0.33	32.98	± 0.91
T20	0.71	34.59	± 0.33	36.06	± 0.57
T40	0.70	41.99	± 0.40	41.21	± 1.05
T60	0.63	45.14	± 0.20	46.66	± 0.22
T75	0.57	50.50	± 0.62	46.80	± 0.29

Porovnání predikovaných hodnot účinnosti elektromagnetického stínění s experimentálně zjištěnými hodnotami téhož parametru na celém frekvenčním pásmu je zobrazeno na obr. 6.48. Byl potvrzen předpoklad, že výpočet na základě znalosti elektrických vlastností materiálu je vhodné použít při vyšších frekvencích ($f > 1.5$ GHz), kdy převládá právě elektrická složka elektromagnetického pole. Dále je možno pozorovat, že predikční vztah má omezenou platnost pro textilní struktury, které obsahují dostatečně vysoký obsah vodivé komponenty nad perkolačním prahem ($P > P_0$). Pro vzorky s nízkým obsahem nerezového ocelového vlákna, kde není dosaženo spojitě vodivé struktury, není použití predikčního vztahu vhodné.



Obrázek 6.48: Frekvenční závislost efektivity stínění elektromagnetického pole skupiny vzorků č. 1 - porovnání predikovaných hodnot s hodnotami experimentálně zjištěnými.



Obrázek 6.49: (a) Porovnání stínící efektivity predikované a experimentálně zjištěné, (b) empirický Q-Q graf.

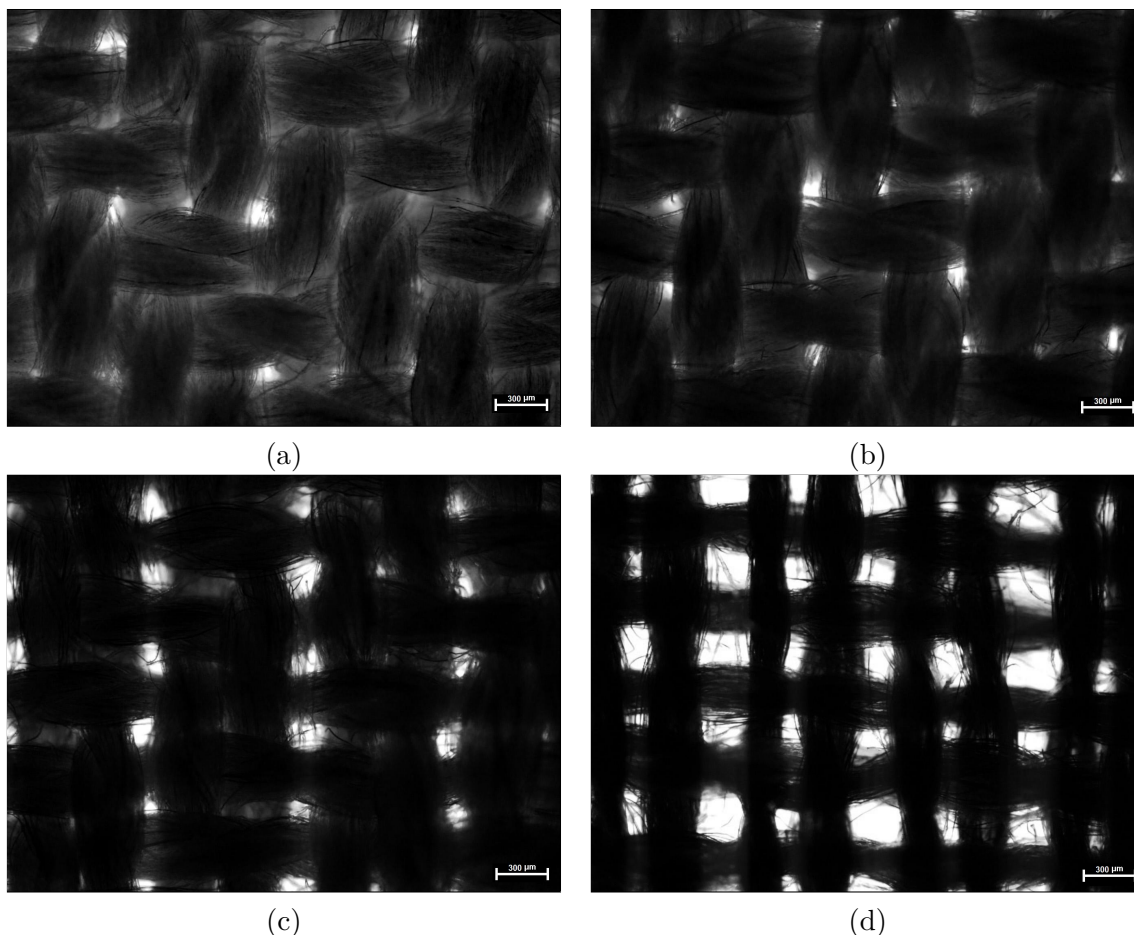
Grafické porovnání hodnot stínící efektivity predikovaných a experimentálně zjištěných vč. 95% intervalů spolehlivosti je předvedeno na obr. 6.49(a). Dobrou shodu predikovaných hodnot s experimentálně zjištěnými (překrývající se intervaly spolehlivosti) je možno pozorovat u vzorků T5 - T40. U vzorků s obsahem kovového vlákna 60 a 75 % predikce není přesná, což je pravděpodobně způsobeno tím, že numerický model předpokládá kompaktní strukturu vzorku bez jakýchkoli nespojitostí. Tento předpoklad však není u tkanin s vyšším obsahem vodivé komponenty splněn. Zvyšováním obsahu nerezového ocelového vlákna totiž klesá průměr příze a při zachování konstantní dostavy osnovy a útku dosahují tkané vzorky s vyšším obsahem vodivé komponenty nižšího zakrytí s výraznými nespojitostmi (póry) (viz obr. 6.50), které zejména pro vyšší frekvence výrazně snižují stínící účinnosti celého prvku.

Empirický Q-Q graf hodnot stínící efektivity predikovaných a experimentálně zjištěných (obr. 6.49(b)) pro skupinu vzorků splňující podmínku koncentrace nerezového ocelového vlákna v oblasti nad perkolačním prahem (P_0) ukazuje výraznou shodu predikovaných dat s daty experimentálně zjištěnými potvrzenou lineárním průběhem. Regresní přímka má směrnici 1.083 a úsek -3.08. Korelační koeficient $r = 0.9844$ ukazuje na vysokou korelaci mezi predikcí a experimentem a ukazuje se, že navržený lineární regresní model je statisticky významný. Z úseku regresní přímky je zřejmé, že predikované hodnoty SE jsou cca o 3 dB vyšší v porovnání s hodnotami přímo měřenými.

6.5.3 Shrnutí

V rámci této podkapitoly byl zkoumán vztah mezi elektrickými vlastnostmi a efektivitou elektromagnetického stínění s cílem predikovat velikost účinnosti elektromagnetického stínění na základě znalosti elektrické vodivosti materiálu, a to proto, že přímé měření účinnosti elektromagnetického stínění vyžaduje využití speciálních zařízení a dle dosavadních zkušeností jsou výsledky výrazně ovlivněny použitou měřicí metodou.

Byl prozkoumán vztah mezi povrchovou, resp. objemovou rezistivitou vzorků charakterizující elektrickou vodivost materiálu a měřenou účinností elektromagnetického stínění. Rozsáhlými experimenty byla potvrzena vysoká korelace mezi objemovou rezistivitou a účinností elektromagnetického stínění vzorků tkaných obsahujících koncentraci nerezového ocelového vlákna nad perkolačním prahem. Využitím navržených vztahů je



Obrázek 6.50: Mikroskopické snímky studovaných textilií skupiny 1: (a) vzorek T5, (b) vzorek T15, (c) vzorek T40, (d) vzorek T75.

možno predikovat účinnost elektromagnetického stínění na základě znalosti elektrické vodivosti materiálu.

Byla ověřena také využitelnost již publikovaných numerických vztahů určených původně pro predikci stínící účinnosti pevných kompozitních materiálů. Byla zjištěna dobrá shoda naměřených hodnot s daty vypočtenými pomocí modelu a potvrzen předpoklad, že výpočet na základě znalosti elektrických vlastností je vhodné použít při vyšších frekvencích, kdy převládá elektrická složka elektromagnetického pole. Dále bylo zjištěno, že predikční vztah je omezen pro textilní struktury vykazující dostatečně vysokou vodivost (obsah vodivé komponenty nad perkolačním prahem). Rozdíly mezi predikcí a experimentálně zjištěnou výší elektromagnetické stínící účinností vzorků jsou zřejmě způsobeny tím, že numerický model je určený pro materiály s kompaktní strukturou. Tento předpoklad však není u textilních struktur splněn.

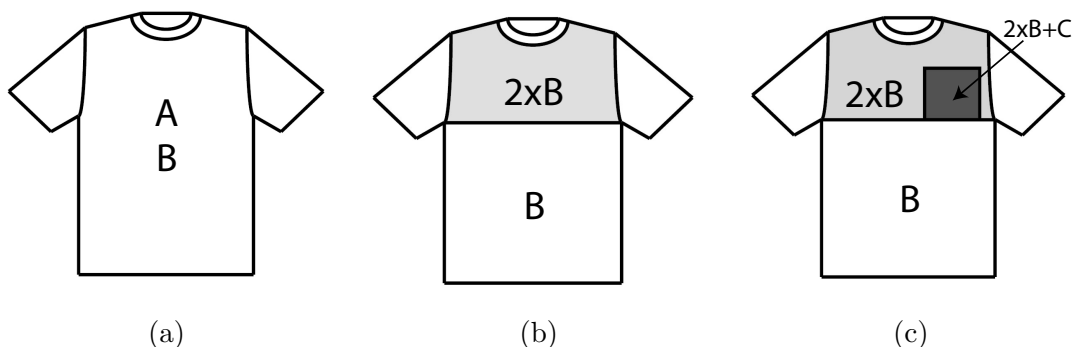
Dílí výsledky práce byly publikovány v odborných časopisech a ve sbornících mezinárodních konferencích [79, 84, 113].

6.6 Prototypy oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu

Na základě charakterizace již vytvořených vzorků textilií odolných vůči elektromagnetickému smogu (pletené a tkané vzorky s různým obsahem a umístěním vodivé komponenty) bylo vytipováno vyhovující materiálové složení, vyhovující struktura textilie a vyhovující stříhové řešení pro tvorbu konečných produktů odolných vůči elektromagnetickému smogu. Cílem bylo zvolit textilní struktury vhodné pro tvorbu oděvu určeného pro každodenní nošení, a to jako první vrstva na těle při zachování uspokojivého komfortu nošení. Jak uvádí Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením, dostačující efektivita stínění se pro obecnou ochranu před zdroji záření o nízkém výkonu pohybuje v oblasti kolem 6 - 9 dB pro frekvenční spektrum 0.8 - 2.5 GHz [71].

Z hlediska optimálního materiálového složení byl zvolen typ příze (jemnost 25 tex) obsahující 3 a 10 % kovového vlákna Bekinox ve směsi s vláknem nevodivým. Jako doplňkové nevodivé vlákno bylo zvoleno vlákno kruhové polypropylenové a za účelem zvýšení komfortu nošení bylo použito také funkční polyesterové vlákno obchodního označení Coolmax. Z hlediska vazby byly zvoleny pletené struktury, a to zejména s přihlédnutím k cíli vytvořit první vrstvu oděvu, která bude vhodná i pro sportovní využití. Pleteniny tuto podmínku díky své nízké plošné hmotnosti, vysoké splývavosti, nízké ohybové tuhosti a vysoké pružnosti splňují. Na základě předchozích výsledků byla zvolena zátažná jednolíná pletenina hladká a zátažná oboulícní hladká, z hlediska stříhového řešení byly vytvořeny následující prototypy oděvu, trika (obr. 6.51 a 6.52).

Na obrázku 6.51(a) je zobrazeno triko, které je celé tvořené jednoduchou pleteninou. Tento typ trika byl vyroben ve dvou materiálových složeních, a to 90 % PP/10 % SS (dále označeno A) a 97 % Bekinox /3 % SS (dále označeno B). Z důvodu předpokladu nižší stínící účinnosti trika obsahujícího pouze 3 % nerezového ocelového vlákna v porovnání s trikem obsahujícím 10 % kovového vlákna a z důvodu požadavku na zvýšenou ochranu citlivých částí těla byly připraveny dvě další konstrukční alternativy trika obsahujícího nižší obsah vodivé komponenty. Jedná se o triko, jehož hrudní část je tvořena dvojitou základní pleteninou (označena šedou barvou viz obr. 6.51(b)), přičemž vrstvy jsou proti sobě pootočené o 90° tak, aby bylo docíleno zvýšení bariérní schopnosti textilní struktury.



Obrázek 6.51: Prototyp oděvu tvořený (a) jednoduchou pleteninou, (b) zdvojenou pleteninou v hrudní části, (c) zdvojenou pleteninou v hrudní části vč. vložení tkaniny v oblasti srdce.



Obrázek 6.52: Fotografie vytvořených oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu.

Tabulka 6.34: Parametry textilií použitých pro tvorbu oděvů.

Vzorek	Složení	Vazba	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Tloušťka vzorku [mm]
A	90% PP/10% SS	jednolící	160	0.54
B	97% Coolmax/3% SS	oboulící	200	0.69
C	99% PP/1% SS	kepr 2/2	233.5	0.78

Poznámka: SS - označení pro nerezové ocelové vlákno.

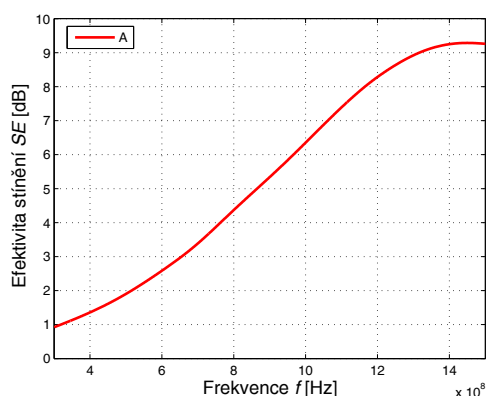
Na obrázku 6.51(c) je zobrazen další prototyp oděvu, který má nejen zdvojenou hrudní část, v oblasti srdce je navíc dosaženo ještě vyššího odstínění elektromagnetického pole vložení tkaniny obsahující 1 % vodivé komponenty (označena tmavě šedou barvou) mezi dvě vrstvy pleteniny. Vyšší elektromagnetické stínění v oblasti srdce je použito za účelem např. ochrany kardiostimulátoru před nežádoucími účinky elektromagnetického záření. V tabulce 6.34 jsou uvedeny základní vlastnosti použitých pletenin pro tvorbu trik odolných vůči elektromagnetickému smogu (pletenina A a B) a tkaniny použité pro zvýšenou částečnou ochranu lidského těla v oblasti srdce (označena písmenem C).

6.6.1 Hodnocení stínící účinnosti

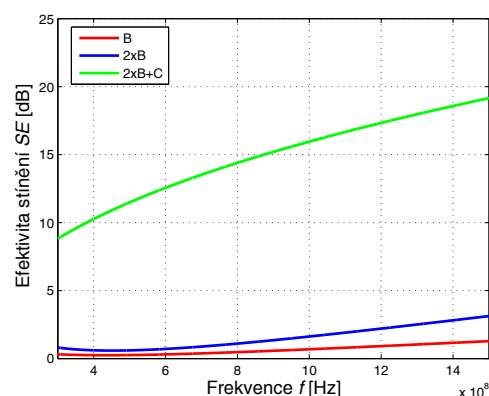
Efektivita stínění elektromagnetického pole (SE) oděvů byla hodnocena dle normy ASTM 4935-99, která je určená pro hodnocení plošných materiálů. Tato norma pracuje s předpokladem dopadu rovinné vlny na stínící přepážku v blízké zóně elektromagnetického pole. Efektivita stínění vzorků byla měřena ve frekvenční oblasti 30 MHz až 1.5 GHz. Použité přístroje vč. charakteristiky rozměrů vzorků jsou popsány v kapitole 6.2.3. Efektivita elektromagnetického stínění byla měřena vždy na minimálně 5 odlišných místech textilie. V případě tkaného vzorku byla získaná závislost SE na frekvenci aproximována pomocí zobecněné logaritmické funkce. Pro aproximaci závislosti efektivy stínění na frekvenci pleteného vzorku bylo využito kubického vyhlazovacího spline, viz kapitola 6.2.3. V tabulce 6.35 jsou uvedeny pro vybrané frekvence pivotové polosumy SE spolu s intervaly spolehlivosti materiálu A (jednolící pletenina 90 % PP/10 % SS), materiálu B (oboulící pletenina 96 % Coolmax/3 % SS), dvouvrstvé části trika označené 2xB a oblasti trika, která je vyztužená za účelem zvýšení ochrany oblasti srdce tkaninou (2xB+C).

Tabulka 6.35: Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty SE různých částí prototypů oděvů.

Označení	Efektivita elektromagnetického stínění SE [dB]					
	$f=600$ MHz		$f=1$ GHz		$f=1.5$ GHz	
	P_L	95% IS	P_L	95% IS	P_L	95% IS
A	2.58	± 0.27	6.35	± 0.30	9.26	± 0.26
B	0.31	± 0.05	0.68	± 0.04	1.28	± 0.08
2xB	0.71	± 0.08	1.62	± 0.15	3.13	± 0.33
2xB+C	12.56	± 0.26	15.96	± 0.30	19.16	± 0.26



(a)



(b)

Obrázek 6.53: Závislost efektivity stínění elektromagnetického pole na frekvenci (a) materiálu A, (b) jednotlivých částí prototypu oděvu tvořeného materiálem B v kombinaci s materiálem C.

Na obrázku 6.53(a) je zobrazena frekvenční závislost účinnosti elektromagnetického stínění na frekvenci trika tvořeného jednou vrstvou materiálu A. Totožná závislost pro prototyp trika, které je tvořeno materiálovým složením B, zdvojenou hrudní částí (2xB) a vyztuženou oblastí trika tkaninou (2xB+C) je zobrazena na obr. 6.53(b).

Byl potvrzen předpoklad, že prototyp oděvu obsahující 10 % nerezového ocelového vlákna bude obsahovat vyšší SE v celém frekvenčním pásmu (SE cca 9 dB při frekvenci 1.5 GHz) v porovnání s prototypem oděvu obsahujícím pouze 3 % vodivé komponenty (SE cca 1 dB při frekvenci 1.5 GHz). Byla ověřena také domněnka docílení vyšší stínící účinnosti zdvojením materiálu, popř. vyztužením určitých částí oděvu tkaninou se zvýšenou vodivostí. Při zdvojení materiálu bylo dosažené cca dvojnásobné stínící účinnosti oproti jednovrstvému materiálu. Je nutno připomenout, že materiál je zdvojený pouze v oblasti hrudníku. Celkové komfortní vlastnosti oděvu nejsou výrazně znehodnoceny, citlivé partie těla (srdce) jsou však ochráněny. Nejvyšší stínící účinnosti je dosaženo u výrobku, kde je navíc mezi dvě vrstvy pleteniny umístěna tkanina se zvýšenou vodivostí – v tomto místě je dosaženo stínící účinnosti kolem 19 dB pro $f = 1.5$ GHz. Triko celé tvořené tkaninou by bylo nekomfortní. Vložením tkaniny omezených rozměrů je dosaženo žádoucí ochrany určité tělesné partie při zachování mechanických vlastností pleteného oděvu.

6.6.2 Hodnocení subjektivního komfortu nošení

Vytvořené prototypy oděvů (trik) tvořených jednoduchou pleteninou odolných vůči elektromagnetickému smogu byly testovány z hlediska subjektivního komfortu nošení. Trika byla vyrobena ve dvou provedeních: dámské, pánské. Dámský oděv byl připraven ve velikosti M, pánský ve velikosti L. Cílem šetření bylo zjistit, jak se probandi cítí v předložených prototypu vyvinutých oděvů.

Celkem 12 probandů (4 ženy, 12 mužů), neodborníků v textilní oblasti obdrželo sadu oděvů, tj. 2 typy trik uvedených v tabulce 6.34. Cílem probandů bylo obě trika opakovaně otestovat při fyzické zátěži nošením na těle a dle subjektivních pocitů a pozorování během a po testování vyplnit předložený dotazník. Vzhledem k rozsáhlosti šetření a vyhodnocení získaných informací jsou v této práci uvedeny pouze nejdůležitější shrnutí. Hodnocena byla zejména úroveň fyziologického komfortu (dostatečný odvod vlhkosti, optimální tepelná izolace, dostatečná prodyšnost), úroveň senzorického komfortu (měkkost, pocit škrábání, lepení a dráždění, přítomnost vlhkosti a omak), přítomnost alergických reakcí, změny oděvů při nošení a praní. Probandi nebyli informováni o obsahu funkčního materiálu ve vzorku a měli na závěr možnost vybrat oděv, který by doporučili svým přátelům.

Lze shrnout, že celkově lépe byl hodnocen dle subjektivního komfortu při nošení vzorek A, tedy vzorek obsahující nižší obsah vodivé komponenty a funkční vlákno Coolmax v porovnání se vzorkem B obsahujícím 10 % vodivé komponenty. Vzorek A dosáhl celkového hodnocení na stupnici od 1 do 5 pro veškeré parametry průměrné známky cca 1.5, přičemž vzorek B dosáhl průměrné známky cca 2. Z provedených statistických vyhodnocení však nelze pozorovat významné rozdíly mezi oběma studovanými vzorky u jednotlivých sledovaných charakteristik. U trika A nebyla zaznamenána žádná alergická reakce, u trika B se vyskytla alergická reakce v 1 případě z celkových 12 hodnocení. Dalším úkolem hodnotitelů bylo vyjádřit se k pozorovaným změnám po nošení a praní testovaných trik. Hodnocena byla tvarová změna, změna barvy a tvorba žmolků. Změna tvaru byla pozorována pouze u trika B. Tvorba žmolků po praní byla pozorována u obou trik, triko A získalo z hlediska tvorby žmolků známku 3, triko B bylo ohodnoceno z hlediska žmolků známkou 2. Na závěr měli hodnotitelé možnost některé z testovaných oděvů doporučit přátelům. Všechny 12 hodnotitelů doporučilo triko označené A, 5 hodnotitelů zároveň doporučilo triko označené B.

Testovány byly také vybrané objektivní parametry fyziologického komfortu (tepelné charakteristiky, propustnost vzduch a vodní páry) jak jednovrstvých pletenin, tak míst oděvu, kde byla pletenina zdvojená, či byla mezi dvě pleteniny navíc vložena textilie. Z provedeného testování je zřejmé, že materiály a textilní struktury vyvinuté za účelem ochrany člověka se z hlediska vybraných komfortních vlastností výrazně neliší od klasických materiálů a struktur používaných v oděvním průmyslu. Tepelná vodivost se pohybuje okolo $0.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Propustnost pro vzduch i vodní páry je velmi dobrá (paropropustnost se pohybuje okolo 70 %, prodyšnost vzorku A je $890 \text{ l} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, vzorku B $2200 \text{ l} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Pro zvýšení ochrany je možno využít prototypy oděvů, které mají v určitých místech zvýšenou účinnost bránit průniku elektromagnetického záření. Je zřejmé, že v místech, kde je textilie zdvojená (oblast hrudníku) je sice snížena jak prodyšnost, tak propustnost pro vodní páry (až o 30 %), ale vzhledem k tomu, že snížení propustností je pouze místní (oblast hrudníku na předním díle oděvu), neovlivňuje celkový komfort nošení oděvu.

6.6.3 Shrnutí

V této podkapitole je popsána tvorba a testování prototypů oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu. Cílem bylo vytvořit oděvy (první oděvní vrstva) pro každodenní nošení či sport při zachování uspokojivého komfortu nošení, přičemž požadavek na stínící efektivitu se pro oděvy pro obecné použití při předpokladu nižší výkonové hustoty zdroje elektromagnetického záření pohybuje v oblasti 6 - 9 dB.

Na základě rozsáhlé charakterizace již vytvořených vzorků textilií odolných vůči elektromagnetickému smogu (pletené a tkané vzorky s různým obsahem a umístěním vodivé komponenty) bylo vytipováno optimální materiálové složení, vhodná struktura textilie a vyhovující střihové řešení pro tvorbu konkrétního konečného produktu. S ohledem na mechanické vlastnosti (ohybová tuhost, pružnost) byly z hlediska struktury zvoleny pro tvorbu oděvního výrobku pleteniny (jemnost příze 25 tex). Z hlediska optimálního materiálového složení byl zvolen typ příze obsahující 3 a 10 % nerezového ocelového vlákna Bekinox ve směsi s vláknem nevodivým. Jako doplňkové nevodivé bylo zvoleno vlákno kruhové polypropylenové a za účelem zvýšení komfortu nošení bylo použité také funkční polyesterové vlákno obchodního označení Coolmax. Z hlediska konstrukčního řešení byly vytvořeny tři typy trik - jednoduché, s vyšší ochranou hrudní části (zdvojení pleteniny) a s velmi vysokou ochranou srdce (mezi zdvojenou pleteninou je vložena tkanina obsahující 1 % vodivé komponenty). Veškeré části vytvořených oděvů byly hodnoceny z hlediska odolnosti vůči elektromagnetickému smogu. Dále byly oděvy hodnoceny dle subjektivního komfortu nošení.

Bylo zjištěno, že prototyp oděvu obsahující 10 % nerezového ocelového vlákna dosahuje efektivity stínění elektromagnetického pole (SE) cca 9 dB při frekvenci 1.5 GHz, zatímco prototyp oděvu s koncentrací vodivé komponenty pouze 3 % dosahuje SE cca 1 dB. Zdvojením materiálu obsahujícího 1 % nerezového ocelového vlákna a 99 % vlákna Coolmax v hrudní části (vrstvy pleteniny jsou proti sobě pootočený o 90°) bylo docíleno zvýšení stínící účinnosti při $f = 1.5$ GHz na cca dvojnásobek. Nejvyšší stínící účinnosti bylo dosaženo u výrobku, kde byla navíc mezi dvě vrstvy pleteniny umístěna tkanina se zvýšenou vodivostí. V tomto místě bylo dosaženo stínící účinnosti kolem 19 dB pro $f = 1.5$ GHz.

Vytvořené prototypy oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu byly testovány z hlediska subjektivního pocitu při nošení. Cílem šetření bylo zjistit, jak se probandí cítí v předložených trikách obsahujících jak různý obsah kovového vlákna, tak různý typ nevodivé komponenty. Z provedeného šetření lze shrnout, že celkově nejlépe dopadl vzorek obsahující nižší podíl kovového vlákna ve směsi s funkčním vláknem Coolmax, avšak mezi hodnoceními obou studovaných oděvů nebylo možno pozorovat významné rozdíly. Pro zvýšení ochrany proti elektromagnetickému smogu a přitom při zachování komfortu nošení je možno využít prototypy oděvů, které mají v určitých místech zvýšenou účinnost bránit průniku elektromagnetického záření. V místech, kde je textilie zdvojena (oblast hrudníku) je sice snížena jak prodyšnost, tak propustnost pro vodní páry, ale vzhledem k tomu, že je snížení propustností pouze místní, výrazně neovlivňuje celkovou úroveň komfortu oděvu.

7 Zhodnocení výsledků a nových poznatků

Cílem disertační práce bylo vytvořit plošné textilie a následně z těchto textilií oděvy vyznačující se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému záření při zachování základních vlastností kladených na textilie používané v textilním, popř. oděvním průmyslu. Záměrem bylo odstínit elektromagnetického pole ve frekvenční oblasti zhruba od 700 MHz do 2.5 GHz. Toto frekvenční pásmo zahrnuje jak komunikační systémy včetně navigačních jednotek GPS a mobilních telefonů (GSM 900, GSM 1800), tak např. frekvenci radiolokátorů, či mikrovlnných trub (2.45 GHz). Obsahem práce bylo prostudování vybraných textilních struktur „vlákno-příze-textilie“ z hlediska především elektrického chování a odolnosti vůči elektromagnetickému smogu.

V průběhu řešení práce se podařilo zkonstruovat přípravek a vytvořit původní metodiku pro hodnocení elektrického odporu délkových textilních útvarů v závislosti na upínací délce. Zařízení včetně metodiky měření elektrického odporu lineárních textilních útvarů s eliminací kontaktního odporu je (od 27.5.2013) chráněno užitným vzorem. V oblasti elektrických vlastností délkových textilních útvarů byly studovány jak příze klasické (téměř nevodivé), tak příze antistatické používané v textilním průmyslu za účelem eliminace problémů způsobovaných statickou elektřinou a vodivý drát, a to s cílem porovnat výši elektrické vodivosti těchto odlišných materiálů. Z hlediska zjištěné relativně nízké vodivosti byly příze nevodivé a antistatické označeny jako nevhodné pro budoucí konstrukci bariérových textilií chránících proti elektromagnetickému smogu. Kovový drát sice vykazoval velmi uspokojivou vodivost, avšak díky vysokému průměru a s tím spojeným nepříznivým mechanickým vlastnostem (zejména vysoké ohybové tuhosti) byl pro další textilní zpracování nevhodný. Použití kovových vláken konečné délky vyznačujících se velmi nízkým průměrem ($d < 10 \mu\text{m}$) bylo shledáno jako perspektivní, a to s ohledem na vysokou elektrickou vodivost a díky nízkému průměru uspokojivé mechanické vlastnosti.

Na základě předchozího průzkumu dostupných vláken vhodných pro textilní využití byly navrženy a vytvořeny příze obsahující ve své struktuře velmi jemná nerezová ocelová vlákna v různé koncentraci. Nerezová ocel byla zvolena vzhledem ke své dostatečně vysoké elektrické vodivosti, uspokojivé životnosti, flexibilitě a především kvůli odolnosti vůči korozi v prostředí běžného typu. Odolnost vůči korozi představuje důležitý požadavek na použitý materiál zejména z důvodu plánované údržby konečných produktů praním. Tyto hybridní příze byly studovány hlavně z hlediska jejich elektrických vlastností. Rozsáhlé experimenty prokázaly silně nelineární závislost elektrického odporu na upínací délce přízí obsahujících ve své struktuře velmi jemná staplová kovová vlákna. Za účelem možnosti výpočtu součinitele specifické rezistivity byl představen jednoduchý mechanistický model. Součinitel specifické rezistivity je možno použít pro hodnocení přízí s odlišným obsahem vodivé komponenty a průzkum perkolačního prahu. To umožňuje optimalizaci množství poměrně finančně nákladných kovových vláken pro získání

dostatečně vodivé příze. Podařilo se docílit zvýšení elektrické vodivosti přízí při zachování ostatních vlastností kladených na příze používané v textilním průmyslu. Na základě provedených šetření jak elektrických, tak vybraných mechanických vlastností byly hybridní příze shledány jako vhodné pro další zpracování klasickými textilními technikami s cílem vytvořit plošné textilie s dostatečnou elektrickou vodivostí a předpokládanou odolností vůči elektromagnetickému smogu.

Pomocí připravených hybridních přízí byla v rámci řešení disertační práce navržena a vytvořena rozsáhlá sada textilií (tkanin, pletenin) s různým podílem a různým umístěním vodivé komponenty. Uskutečněno bylo hodnocení textilií jak z hlediska elektrické vodivosti, tak z hlediska účinnosti elektromagnetického stínění. Studován byl vliv vodivé komponenty na obě charakteristiky, vliv počtu vrstev, vliv velikosti rozteče hybridní příze v osnově a útku, vliv struktury a studovány byly také perkolační prahy vodivé komponenty. Podařilo se nalézt struktury, které vykazují určitý stupeň ochrany před účinky elektromagnetického pole (stínící účinnost od 1 až do 50 dB při frekvenci 1.5 GHz) při zachování základních vlastností kladených na textilie používané v textilním průmyslu, popř. v oděvnictví. V tabulce 7.1 je znázorněno porovnání stínící účinnosti hybridních textilií vyvinutých v práci (označeny tučně) s materiály běžně používanými v textilním průmyslu (jako zástupce zvolena 100 % bavlněná tkanina) a materiály používanými k odstínění elektromagnetického pole (substrát upravený vodivým polymerem, uhlíková a pokovená tkanina, hliníková folie). Tyto materiály vykazují uspokojivě vysokou stínící účinnost, nejsou však vhodné pro oděvní účely. Textilie upravené vodivým polymerem není možno prát (praním ztrácí stínící schopnost), uhlíkové tkaniny dosahují příliš vysoké ohybové a smykové tuhosti, pokovené tkaniny a kovové folie není vhodné pro oděvní účely použít díky nepříznivým termofyziologickým vlastnostem.

Bylo prokázáno, že elektromagnetická stínící schopnost vyvinutých vzorků hybridních textilií se aplikací pracích cyklů výrazně nemění a jako nevodivou komponentu (matrici) je možno použít téměř jakékoliv vlákno zpracovatelné textilními technikami - od klasických až po vysoce funkční vlákna. Byly představeny predikční vztahy, pomocí kterých lze optimalizovat množství vodivé komponenty ve vzorku pro splnění požadavku na výši elektromagnetické stínící účinnosti a konkrétního účelu použití výrobku.

Tabulka 7.1: Stínící účinnost vodivých plošných materiálů měřená dle ASTM 4935 při frekvenci 1.5 GHz (materiály vyvinuté v rámci disertační práce jsou zvýrazněny tučným písmem).

Materiál	<i>SE</i> [dB]
100 % bavlněná tkanina	0
Hybridní pletenina složení 80 % PP/20 % SS	10
PP tkanina obsahující mřížku 5x5 mm složení 80 % PP/20 % SS	14
PES tkanina povrstvená vodivým polymerem (PPY)	20
Hybridní textilie 25 % PP /75 % SS	50
100 % uhlíková tkanina (190 g.m ⁻²)	57
Tkanina pokovená mědí	67
100 % hliníková folie (30 g.m ⁻²)	80

Bylo představeno nové, v průběhu řešení práce vyvinuté a otestované zařízení určené pro hodnocení stínící účinnosti plošných materiálů. Výsledky získané komparativní studií porovnávající naměřená data stínící účinnosti sady vzorků nově navrženou metodikou s normovanou metodikou ukazují, že navržený měřicí přístup na bázi vlnovodu překonává nedostatky stávajících zařízení pro měření elektromagnetické stínící účinnosti textilních vzorků a je vhodný pro rychlé hodnocení elektromagnetické odolnosti zejména nově připravených vzorků omezených rozměrů získaných laboratorními technikami.

Experimentálně bylo ověřeno, že porovnávat hodnoty efektivity elektromagnetického stínění naměřené pomocí odlišných přístrojů a metodických přístupů je nesnadné. Nejvyšší rozdíly byly pozorovány při porovnání přístupů založených na fyzikálně odlišném principu šíření elektromagnetické vlny. Pro měření odolnosti textilních vzorků vůči elektromagnetickému smogu se zdá být jako nejvhodnější použití normované metodiky využívající přerušené koaxiální vedení s použitím komerčně vyráběné měřicí hlavičky.

Na základě prozkoumání vztahu mezi elektrickými vlastnostmi, které jsou snadno měřitelné a efektivitou elektromagnetického stínění se podařilo nalézt korelaci mezi elektrickou rezistivitou a účinností elektromagnetického stínění. Byly prozkoumány a využity vztahy publikované v odborných časopisech umožňující výpočet efektivity stínění elektromagnetického pole kompozitních materiálů. Oba uvedené typy modelů jsou snadno využitelné pro predikci stínící účinnosti plošných textilních struktur. Osvědčila se implementace teoretických vztahů pro výpočet stínící účinnosti na základě znalosti objemové rezistivity.

Na závěr práce bylo využito nabytých poznatků získaných v průběhu řešení práce a vytvořena sada konečných oděvních produktů odolných vůči elektromagnetickému smogu. Experimentálně bylo ověřeno, že oděvy vykazují určitý stupeň odolnosti vůči elektromagnetickému smogu (10 - 18 dB pro frekvenci 1.5 GHz), který lze řídit množstvím vodivé komponenty, strukturou textile a konstrukčním řešením oděvu pro získání výrobku pro konkrétní účel použití. Bylo potvrzeno, že se komfortní vlastnosti vyvinutých oděvů výrazně neliší od klasických materiálů a struktur používaných v oděvním průmyslu.

Je zřejmé, že vyvinuté a v práci charakterizované textilní struktury a následně oděvy byly vytvářeny s cílem získání určité bariérní schopnosti materiálu vůči elektromagnetickému záření. Základním požadavkem pro splnění tohoto cíle je relativně vysoká elektrická vodivost materiálu v porovnání s požadavkem např. pro materiály používané jako antistatické. Vyvinuté materiály tedy mohou být použity nejen za účelem odstínění elektromagnetického pole, ale také pro tvorbu oděvů antistatických, oděvů určených do čistých prostor, či v dalších textilních odvětvích (inteligentní textilie), kde je vyžadován určitý stupeň elektrické vodivosti. Jako doporučení pro budoucí práci lze uvést vhodnost průzkumu dalších parametrů, u kterých se předpokládá, že budou mít významný vliv elektromagnetické stínění vyvinutých hybridních textilních struktur jako je např. jemnost příze, dostava tkanin či hustota řádků a sloupků pletenin, dále vliv vazby a další. Tvorba numerických vztahů vhodných pro výpočet stínící účinnosti textilií zohledňujících nejen elektrickou vodivost, ale také geometrické charakteristiky textilních struktur se zdá být také doposud ne zcela prozkoumaná. V neposlední řadě je možno výzkum v oblasti tvorby bariérních elektromagneticky stínících textilií vhodných pro oděvní účely směřovat také do dalších principiálně odlišných přístupů výroby jako je např. využití vodivých polymerů, pokovování a dalších.

8 Použitá literatura

- [1] KNITTEL, D. and SCHOLLMAYER, E. Electrically High-Conductive Textiles. *Synthetic Metals*, **159**(14), 2009, pp. 1433–1437.
- [2] XUE, P. et al. Electrically Conductive Yarns Based on PVA/Carbon Nanotubes. *Composite Structures*, **78**(2), 2007, pp. 217–277.
- [3] TZENG, S. S. and CHANG, F. EMI Shielding Effectiveness of Metal-Coated Carbon Fiber-Reinforced ABS Composites. *Material Science and Engineering: A*, **302**(2), 2001, pp. 258–267.
- [4] JANA, P., MALLICK, A., and DE, S. Electromagnetic Interference Shielding by Carbon Fibre-Filled Polychloroprene Rubber Composite. *Composites*, **22**(6), 1991, pp. 451–455.
- [5] SHYR, T. and SHIE, J. Electromagnetic Shielding Mechanism Using Soft Magnetic Stainless Steel Fiber Enabled Polyeter Textiles. *Journal of Magnetic Materials*, **324**(23), 2012, pp. 4127–4132.
- [6] CHUNG, D. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Materials. *Carbon*, **39**(2), 2001, pp. 279–285.
- [7] JALALI, M. et al. Electromagnetic Shielding of Polymer-Matrix Composites with Metallic Nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, **42**(6), 2011, pp. 1420–1426.
- [8] DENG, H. et al. Effect of Thermal Annealing on the Electrical Conductivity of High-Strength Bicomponent Polymer Tapes Containing Carbon Nanoparticles. *Synthetic Metals*, **160**(5-6), 2010, pp. 337–344.
- [9] YILDIZ, Z., USTA, I., and GUNGOR, A. Electrical Properties and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Polyester Yarns with Polypyrrole Deposition. *Textile Research Journal*, **82**(20), 2012, pp. 2137–2148.
- [10] RAMACHANDRAN, T. and VIGNESWARAN, C. Design and Development of Copper Core Conductive Fabrics for Smart Textiles. *Journal of Industrial Textiles*, **39**(1), 2009, pp. 81–93.
- [11] MOLINA, J. et al. Stability of Conducting Polyester/Polypyrrole Fabrics in Different pH Solutions. *Polymer Degradation Stability*, **95**(1), 2010, pp. 2574–2583.
- [12] ROH, J. et al. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multifunctional Metal Composite Fabrics. *Textile Research Journal*, **78**(9), 2008, pp. 825–835.
- [13] COTTET, D. et al. Electrical Characterization of Textile Transmission Lines. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, **26**(2), 2003, pp. 182–190.
- [14] CLINGERMAN, M. et al. Evaluation of Electrical Conductivity Models for Conductive Polymer Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, **83**(6), 2002, pp. 1341–1356.

- [15] KIRKPATRICK, S. Percolation and Conduction. *Reviews of Modern Physics*, **45**(4), 1973, pp. 574–588.
- [16] BUECHE, F. Electrical Resistivity of Conducting Particles in an Insulating Matrix. *J. Appl. Phys.* **43**(11), 1972, pp. 4837–4838.
- [17] MAMUNYA, E., DAVIDENKO, V., and LEBEDEV, E. Percolation Conductivity of Polymer Composites Filled With Dispersed Conductive Filler. *Polymer Composites*, **16**(4), 1995, pp. 319–324.
- [18] MAMUNYA, E., DAVIDENKO, V., and LEBEDEV, E. Effect of Polymer-Filler Interface Interactions on Percolation Conductivity of Thermoplastics Filled with Carbon Black. *Composite Interfaces*, **4**(4), 1997, pp. 169–176.
- [19] MALLIARIS, A. and TURNER, D. Influence of Particle Size on the Electrical Resistivity of Compacted Mixtures of Polymeric and Metallic Powders. *J. Appl. Phys.* **42**(2), 1971, pp. 416–421.
- [20] NIELSEN, L. Thermal Conductivity of Particulate-Filled Polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, **17**(12), 1973, pp. 3819–3820.
- [21] ROH, H., CHILD, A., and KIMBRELL, W. Toward Real Applications of Conductive Polymers. *Synth. Met.* **71**(1), 1995, pp. 2139–2142.
- [22] ANGELOPOULOS, M. Conducting Polymers in Microelectronics. *IBM J. Res. Dev.* **45**(1), 2001, pp. 57–75.
- [23] YILDIZ, Z., USTA, I., and GUNGOR, A. Investigation of the Electrical Properties and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Polypyrrole Coated Cotton Yarns. *FIBERS&TEXTILES in Eastern Europe*, **21**(2), 2013, pp. 32–37.
- [24] ENGIN, F. and USTA, I. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Polyester Fabric with Polyaniline Deposition. *Textile Research Journal*, **0**(0), 2014, pp. 1–10.
- [25] THOMASSIN, J. et al. Polymer/carbon Based Composites as Electromagnetic Interference Shielding Materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, **74**(7), 2013, pp. 211–232.
- [26] BONALDI, R., SIORES, E., and SHAH, T. Characterization of Electromagnetic Shielding Fabrics Obtained from Carbon Nanotube Composite Coatings. *Synthetic Metals*, **187**(1), 2014, pp. 1–8.
- [27] OZEK, H., AGIRGAN, O., and KELES, M. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Woven Fabrics with Silver Coated Nylon Yarns. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [28] DURAN, D. and KADOGLU, H. Shielding Characteristics of Conductive Woven Fabrics. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [29] H.G., O., T., A., and G., K. Determination of Electromagnetic Shielding Performance of Hybrid Yarn Knitted Fabric with Anechoic Chamber Method. *Textile Research Journal*, **83**(1), 2013, pp. 90–99.
- [30] PALAMUCTU, S. et al. Electrically Conductive Textile Surfaces and their Electromagnetic Shielding Efficiency Measurement. *TEKSTİL ve KONFEKSIYON*, **3**(1), 2010, pp. 199–207.

- [31] CHENG, K. et al. Electromagnetic Shielding Effectiveness of the Twill Copper Woven Fabrics. *J. Reinf. Plast.* **25**(7), 2006, pp. 699–709.
- [32] CHENG, K. et al. Electrical and Impact Properties of The Hybrid Knitted Inlaid Fabric Reinforced Polypropylene Composites. *Composites Part A*, **33**(1), 2002, pp. 1219–1226.
- [33] CHEN, H., LEE, K., and LIN, J. Electromagnetic and Electrostatic Shielding Properties of Co-weaving-knitting Fabric Reinforced Composites. *Composites Part A*, **35**(1), 2004, pp. 1249–1256.
- [34] HEMMING, L. *Architectural Electromagnetic Shielding: A Design and Specification Guide*. Wiley-IEEE Press, 2000.
- [35] PERUMALRAJ, R. et al. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Copper Core-Woven Fabrics. *Journal of the Textile Institute*, **100**(6), 2009, pp. 512–524.
- [36] SIMON, R. EMI Shielding Through Conductive Plastics. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, **17**(1), 1981, pp. 1–10.
- [37] WHITE, D. *A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility*. Don White Consultants, 1971.
- [38] COLANERI, N. and SHACKLETTE, L. EMI Shielding Measurements of Conductive Polymer Blends. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **41**(1), 1992, pp. 291–297.
- [39] HAŇKA, L. *Teorie elektromagnetického pole*. SNTL/ALFA, 1982.
- [40] DUQUESNE, S., MAGNIEZ, C., and CAMINO, G. *Multifunctional Barriers for Flexible Structure: Textile, Leather and Paper*. Springer, 2010.
- [41] PEKÁREK, L. *Neionizující elektromagnetická pole a záření*. [online]. cit. 1. 3. 2014. URL: <http://www.sysifos.cz/index.php?id=vypis&sec=1154526554>.
- [42] HAYT, W. *Engineering electromagnetics*. McGraw-Hill, 1967.
- [43] KAISER, K. *Electromagnetic Shielding*. CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [44] OTT, H. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley, 2009.
- [45] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility*. [online]. Ústav radiotechniky, Praha. cit. 18. 6. 2013. URL: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/>.
- [46] NOVÁK, J. *Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (I)*. [online]. Elektroinstalátér 5/2003. cit. 18. 6. 2013. URL: <http://www.tzb-info.cz/1801-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-i>.
- [47] KODALI, V. and SOCIETY, I. E. C. *Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements, and Technologies*. IEEE Press, 1996.
- [48] KLEINE-OSTMANN, T., MÜNTER, K., and SCHRADER, T. A new shielding effectiveness measurement method based on a skin-effect transmission line coupler. *Advances in Radio Science*, **5**(1), 2007, pp. 37–42.
- [49] GEETHA, S. et al. EMI shielding: Methods and materials—A review. *Journal of Applied Polymer Science*, **112**(4), 2009, pp. 2073–2086.
- [50] WIECKOWSKI, T. and JANUKIEWICZ, J. Methods for Evaluationg the Shielding Effectiveness of Textiles. *FIBERS&TEXTILES in Eastern Europe*, **14**(5), 2006, pp. 18–22.

- [51] VASQUEZ, H., ESPINOZE, L., and LOZANO, K. Simple Device for electromagnetic interference Shielding Effectiveness Measurement. *IEEE*, 2009, pp. 62–68.
- [52] HONG, Y. et al. Method and Apparatus to Measure Electromagnetic Interference Shielding Efficiency and its Shielding Characteristics in Broadband Frequency Ranges. *Review of Scientific Instruments*, **2**(74), 2003.
- [53] *Specified Requirements of Electromagnetic Shielding Textiles*. [online]. Committee for Conformity Assessment on Accreditation and Certification of Functional and Technical Textiles. cit. 18. 6. 2013. URL: <http://www.ftts.org.tw/images/fa003E.pdf>.
- [54] SHINAGAWA, S., KAMAGAI, Y., and URABE, K. Conductive Papers Containing Metallized Polyester Fibers for Electromagnetic Interference Shielding. *Journal of Porous Materials*, **6**(1), 1999, pp. 185–190.
- [55] EL-SALEH, M. and SUNDARARAJ, U. Electromagnetic Interference Shielding Mechanism of CNT/polymer Composites. *Carbon*, **47**(1), 2009, pp. 1738–1746.
- [56] WANG, X. and LIU, Z. Influence of Fabric Density on Shielding Effectiveness of Electromagnetic Shielding Fabric. *Przegląd Elektrotechniczny*, **88**(1), 2012, pp. 235–238.
- [57] KEITH, J. et al. Shielding Effectiveness Density Theory for Carbon Fiber/Nylon 6,6 Composites. *Polymer Composites*, **26**(1), 2005, pp. 671–678.
- [58] ZHANG, C. et al. Electromagnetic Interference Shielding Effect of Nanocomposites with Carbon Nanotube and Shape Memory Polymer. *Composite Science and Technology*, **67**(14), 2007, pp. 2973–2980.
- [59] LOPEZ, C. “Modeling of Textile Reinforced Composite Barriers Against Electromagnetic Radiation”. MA thesis. Czech Republic: Czech Technical University in Prague, 2011.
- [60] HENN, A. and CRIBB, R. Modeling the Shielding Effectiveness of Metallized Fabrics. In: *Electromagnetic Compatibility, 1992. Symposium Record., IEEE 1992 International Symposium on.* 1992, pp. 283–286.
- [61] KEISER, B. *Principles of Electromagnetic Compatibility 3rd Edition*. ARTECH HOUSE Incorporated, 1987.
- [62] MILITKÝ, J. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Technická univerzita v Liberci, 2002.
- [63] VLČEK, J. *Základy elektrotechniky*. Ing. Jiří Vlček, 2006.
- [64] KOŠKOVÁ, B. *Struktura a vlastnosti vláken*. Vysoká škola strojní a textilní, 1989.
- [65] HARLIN, A. and FERENTS, M. *Intelligent Textiles and Clothing*. Woodhead Publishing, 2006.
- [66] MORTON, W. and HEARLE, J. *Physical Properties of Textile Fibres*. Woodhead Publishing, 2008.
- [67] NECKÁŘ, B. *Morfologie a strukturní mechanika obecných vlákenných útvarů*. Fakulta textilní Technická univerzita v Liberci, 1998.
- [68] MILITKÝ, J. and KŘEMENÁKOVÁ, D. Prediction of Fabric Thermal Conductivity. In: *Proceedings of 5th International Textile, Clothing & Design Conference*. Zagreb, Croatia, 2010.

- [69] NERUDA, M. and VOJTĚCH, L. Surface Conductance of Textile Materials Modeling. In: *Proceedings of Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics - KTTO 2010*. Ostrava, Czech Republic, 2010. ISBN: 978-80-248-2330-0.
- [70] TAO, X. and INSTITUTE, T. T. *Wearable Electronics and Photonics*. Woodhead Publishing Series in Textiles Series, 2005.
- [71] NON-IONIZING RADIATION PROTECTION ICNIRP, I. C. of. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, **74**(4), 1998, pp. 494–522.
- [72] MELOUN, M. and MILITKÝ, J. *Kompendium statistického zpracování dat*. Academia, 2002.
- [73] NECKÁŘ, B. Compression and Packing Density of Fibrous Assemblies. *Textile Research Journal*, **67**(2), 1997, pp. 123–130.
- [74] HORN, P. Some easy t statistics. *J. Amer. Statist. Assoc.* **78**(1), 1983, pp. 930–936.

9 Práce autora se vztahem ke studované problematice

9.1 Publikace v odborných časopisech

- [75] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Electromagnetic Shielding Properties of Woven Fabrics Made from High-Performance Fibers. *Textile Research Journal*, January 2014. [Article in press].
- [76] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Mohou textilie reálně pomoci při ochraně proti elektrosmogu? *Vesmír*, **93**(5), 2014, pp. 308–309. ISSN: 1214-4029.
- [77] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Electromagnetic Field Shielding Fabrics with Increased Comfort Properties. *Advanced Material Research*, **677**(1), 2013, pp. 161–168. ISSN: 1022-6680.
- [78] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Comparison of Methods for Evaluating the Shielding Effectiveness of Textiles. *Vlákna a textil*, **19**(3), 2012, pp. 50–56. ISSN: 1335-0617.
- [79] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Numerical and Experimental Study of the Shielding Effectiveness of Hybrid Fabrics. *Vlákna a textil*, **19**(1), 2012, pp. 21–27. ISSN: 1335-0617.
- [80] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. A Study of Electrical Conductivity of Hybrid Yarns Containing Metal Fibers. *Journal of Materials Science and Engineering B*, **2**(2), 2012, pp. 197–202. ISSN: 2161-6221.
- [81] ŠAFÁŘOVÁ, V., GRÉGR, J., and MARTÍNEK, M. Preparation of Functional PET Fabric/Polypyrrole Composite. *Sci. Pap. Univ. Pardubice, Ser. A*, **18**(1), 2012, pp. 117–131. ISSN: 1211-5541.
- [82] ŠAFÁŘOVÁ, V. and ZOBEL, S. Využití techniky plánovaného experimentu pro optimalizaci elektrické vodivosti netkaných textilií. *Informační bulletin České statistické společnosti*, **22**(2), 2011, pp. 184–191. ISSN: 1210-8022.
- [83] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Electromagnetic Shielding of Hybrid Weaves. *World Journal of Engineering*, **7**(3), 2011, pp. 981–982. ISSN: 1708-5284.
- [84] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Correlation between Electric Resistance and Electromagnetic Shielding of Hybrid Weaves. *IVUZ Technologia Textilnoj Promyšlenosti*, **336**(1), 2011, pp. 121–127. ISSN: 1021-3497.

9.2 Kapitola v odborné knize

- [85] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and TRUHLÁŘ, M. “Methods for Evaluating and Predicting the Shielding Effectiveness of Hybrid Textiles”. In: *Selected Properties of Functional Materials*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-28-2.

- [86] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Electromagnetic Field Shielding Fabrics with Increased Comfort Properties”. In: *Selected Properties of Functional Materials*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-28-2.
- [87] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and MARŠÁLKOVÁ, M. “Modified Shielded Box Method for Testing Shielding Effectiveness of Textile Samples”. In: *Selected Properties of Functional Materials*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-28-2.
- [88] ŠAFÁŘOVÁ, V., TUNÁK, M., and MILITKÝ, J. “Prediction of Hybrid Woven Fabrics Shielding Effectiveness”. In: *Selected Properties of Functional Materials*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-28-2.
- [89] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. “Textilní struktury se zvýšenou elektrickou vodivostí”. In: *Vláknenné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [90] ŠAFÁŘOVÁ, V. “Teorie stínění elektromagnetického pole”. In: *Vláknenné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [91] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Textilní struktury odolné vůči elektromagnetickému smogu”. In: *Vláknenné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [92] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Predikce efektivity elektromagnetického stínění”. In: *Vláknenné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [93] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Vliv obsahu kovového vlákna na vybrané charakteristiky textilií souvisejících s komfortem a opotřebením”. In: *Vláknenné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [94] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and HAVELKA, A. “Oděvy odolné vůči elektromagnetickému smogu”. In: *Vláknenné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [95] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Electromagnetic Shielding of Hybrid Fabrics”. In: *Selected Topics of Textile and Material Science*. Publishing House of WBU, 2011. ISBN: 978-8-261-0062-1.

9.3 Příspěvek ve sborníku mezinárodní konference

- [96] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and TRUHLÁŘ, M. Technical Textile Shields Against Electromagnetic Radiation: Materials and Methods. In: *Proceedings of The International Textile Congress 2013*. Istanbul, Turkey, 2013.
- [97] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and MARŠÁLKOVÁ, M. Usability of a Modified Shielded Box Method for Testing Shielding Effectiveness of Textile Samples. In: *Proceedings of 18th International Conference Applied Electronics 2013*. Pilsen, Czech Republic, 2013.
- [98] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and TRUHLÁŘ, M. Methods for Evaluating and Predicting the Shielding Effectiveness of Hybrid Textiles. In: *AUTEX 2012, Proceedings of 12nd AUTEX World Textile Conference*. Zadar, Croatia, 2012. ISBN: 978-953-7105-47-1.

- [99] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Anomalous Electrical Resistance of Hybrid Yarns Containing Metal Fibers. In: *Proceedings of Fiber Society 2011 Spring Conference*. Hong Kong, 2011.
- [100] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Comparison of Methods for Evaluating the Shielding Effectiveness of Textiles. In: *STRUTEX 2011, Proceedings of 18th International Conference on Structure and Structural Mechanics of Textiles*. Liberec, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-7372-786-4.
- [101] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Development of a Hybrid Electromagnetic Shielding Fabrics. In: *ICCM 11, Proceedings of 18th International Conference of Composite Materials*. Jeju Island, South Korea, 2011.
- [102] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and TRUHLÁŘ, M. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Hybrid Fabrics. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [103] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Electromagnetic Shielding of Hybrid Fabrics. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [104] MISHRA, R., ŠAFÁŘOVÁ, V., and MILITKÝ, J. EMI Shielding of Fabrics. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [105] MISHRA, R., ŠAFÁŘOVÁ, V., and MILITKÝ, J. Electromagnetic Shielding of Hybrid Fabrics. In: *Proceedings of International Conference on Composite and Nano Engineering*. Shanghai, China, 2011.
- [106] ŠAFÁŘOVÁ, V. and GRÉGR, J. Functional PET Fabric/Polypyrrole Composite. In: *STRUTEX 2011, Proceedings of 18th International Conference on Structure and Structural Mechanics of Textiles*. Liberec, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-7372-786-4.
- [107] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Hybrid Yarns with Enhanced Electric Conductivity. In: *Proceedings of 5th Aachen-Dresden International Textile Conference*. Aachen, Germany, 2011.
- [108] ŠAFÁŘOVÁ, V. and GRÉGR, J. Preparation and Characterization of Conducting PET Fabric/Polypyrrole Composite for EMI Shielding. In: *IDMS 2011, Book of Abstract of International Days of Material Science*. Pardubice, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-7395-419-2.
- [109] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Technical Shields Against Electromagnetic Radiation - The Present State. In: *KTTO 2011, Proceedings of Workshop of the 11th International Conference Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics*. Ostrava, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-248-2506-9.
- [110] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Prediction of Hybrid Fabrics Electromagnetic Shielding. In: *Proceedings of 3rd International Conference TEXCO' 2010*. Ružomberok, Slovakia, 2010. ISBN: 978-80-969-6107-8.
- [111] ŠAFÁŘOVÁ, V. and GRÉGR, J. Electrical Conductivity Measurement of Fibers and Yarns. In: *TESCI 2010, Proceedings of 7th International Conference Textile Science 2010*. Liberec, Czech Republic, 2010. ISBN: 978-80-7372-638-6.

- [112] ŠAFÁŘOVÁ, V. and ZOBEL, S. Effect of Various Parameters on Temperature Behavior of Nonwovens during Applying Electric Current. In: *Proceedings of 5th International Textile, Clothing & Design Conference*. Zagreb, Croatia, 2010.
- [113] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Correlation between Electric Resistance and Electromagnetic Shielding of Hybrid Weaves. In: *Proceedings of 4th Aachen-Dresden International Textile Conference*. Dresden, Germany, 2010. ISBN: 978-4-901381-32-1.
- [114] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Characterization of Hybrid Fabrics Electromagnetic Shielding Efficiency. In: *STRUTEX 2010, Proceedings of 17th International Conference on Structure and Structural Mechanics of Textiles*. Liberec, Czech Republic, 2010. ISBN: 978-80-7372-664-5.

9.4 Příspěvek ve sborníku domácí konference

- [115] ŠAFÁŘOVÁ, V. and GRÉGR, J. Bariérové textilie chránící proti elektromagnetickému smogu. In: *Sborník konference Textilie v novém tisíciletí IX*. Liberec, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-7372-732-9.

9.5 Užitený vzor

- [116] ŠAFÁŘOVÁ, V., HES, L., and MILITKÝ, J. Zařízení k měření elektrického odporu délkových útvarů, zejména délkových textilních útvarů. Česká republika. Užitený vzor CZ 25429 U1. 27.5.2013.

Seznam obrázků

4.1	Složky rovinné vlny.	16
4.2	Elektromagnetické spektrum.	17
4.3	Vlnová impedance [44].	18
4.4	Vývoj elektrické a magnetické stínící účinnosti v závislosti na frekvenci [40].	20
4.5	Základní mechanismy stínění.	20
4.6	Exponenciální útlum elektromagnetické vlny při průchodu materiálem [44]. .	21
4.7	Útlum absorpcí pro různé materiály.	22
4.8	Odraz a prostup dopadající vlny.	22
4.9	Částečný odraz a průnik nastává na obou rozhraních [44].	23
4.10	Útlum odrazem rovinné elektromagnetické vlny.	24
4.11	Princip měření efektivity stínění pomocí metody stíněné schránky.	28
4.12	(a) Schéma zařízení pro měření efektivity elektromagnetického stínění, (b) simulace vstupujícího elektromagnetického pole dovnitř vlnovodu.	29
4.13	(a) Schéma měření efektivity stínění pomocí koaxiálního přerušeného vedení, (b) fotografie měřící hlavice.	31
4.14	Princip měření efektivity stínění pomocí metody stíněného prostoru.	32
5.1	Rozdělení materiálů podle vodivosti.	37
5.2	Pásový model látky.	38
5.3	Schematický náčrtek přípravku pro měření elektrického odporu délkových textilií.	41
5.4	Schematický náčrtek odpovídajícího elektrického obvodu reprezentující měření elektrického odporu délkových textilních útvarů.	43
5.5	Přípravek pro měření povrchového a vnitřního odporu.	46
5.6	Elektrický odpor jako funkce obsahu vodivého plniva v materiálu.	47
5.7	Elektrický obvod představující segment vodivé textilie [69, 70].	50
5.8	Seskupení experimentu pro zjišťování kontaktního odporu [70].	51
5.9	Elektrický obvod představující základní očko pleteniny [70].	51
6.1	Mikroskopické snímky příze Beltron: (a) podélný pohled , (b) příčný řez. . .	53
6.2	Mikroskopické snímky příze Resistat: (a) podélný pohled; (b) příčný řez. . .	54
6.3	Mikroskopické snímky hybridní příze obsahující: (a) 1 %, (b) 20 % vodivé komponenty.	54
6.4	Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením elektrického odporu příze s teoretickým Laplaceovým rozdělením.	56
6.5	Závislost elektrického odporu na upínací délce L pro (a) přízi Beltron, (b) přízi Resistat, (c) přízi PL a (d) kovový drát.	59
6.6	Závislost elektrického odporu na upínací délce pro hybridní přízi jemnosti 25 tex označené (a) H10 - obsahující 10 % vodivé komponenty, (b) H20 - obsahující 20 % vodivé komponenty.	60

6.7	Závislost (a) specifické rezistivity α (b) logaritmu součinitele specifické rezistivity na obsahu vodivé komponenty P . Inflexní bod je vyznačen červenou barvou.	61
6.8	Závislost elektrického odporu na upínací délce pro hybridní přízi jemnosti 50 tex vzorků označených (a) H20-50 obsahující 20 % vodivé komponenty, (b) H40-50 obsahující 40 % vodivé komponenty a (c) H60-50 obsahující 60 % vodivé komponenty.	62
6.9	Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením (a) pevnosti, (b) tažnosti příze s normálním rozdělením. . . .	64
6.10	Závislost (a) poměrné pevnosti f , (b) tažnosti A a (c) počátečního modulu E na obsahu vodivé komponenty v přízi.	65
6.11	Závislost (a) rychlosti šíření zvukového impulsu c a (b) dynamického modulu E_{dyn} na obsahu vodivé komponenty v přízi.	66
6.12	Korelace mezi dynamickým a počátečním modulem.	66
6.13	Mikroskopické snímky studovaných textilií: (a,b) skupina 1, obsah vodivé komponenty 5 %, resp. 20 %, (c,d) skupina 2, rozteč tzv. vodivé mřížky 5 mm, resp. 3 mm, (e,f) skupina 3 obsahující tzv. vodivou mřížku s 1 %, resp. 10 % kovu, (g,h) skupina 4 obsahující 1 %, resp. 20 % vodivé komponenty. .	70
6.14	Mikroskopické snímky textilií skupiny 5: (a,b) zátažná jedolící pletenina hladká, (c,d) zátažná jedolící s chytovými kličkami - pique, (e,f) zátažná jedolící výplňková - výplněk, (g,h) zátažná interlokovaná pletenina s podloženými kličkami - double face, (i,j) interlokovaná pletenina hladká - interlok. .	71
6.15	Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením (a) povrchového odporu, (b) objemového odporu s normálním rozdělením.	72
6.16	Závislost (a) plošné rezistivity a (b) objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi pro skupinu vzorků č. 1.	75
6.17	Závislost (a) plošné rezistivity, (b) objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi v oblasti nad perkolačním prahem pro skupinu vzorků č. 1 proložená mocninnou funkcí.	75
6.18	Závislost (a) plošné rezistivity, (b) objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi pro skupinu vzorků č. 2, (c) plošné rezistivity, (d) objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi pro skupinu vzorků č. 4. . .	76
6.19	Závislost (a) plošné rezistivity, (b) objemové rezistivity na rozteči hybridní příze tvořící tzv. vodivou mřížku ve skupině vzorků č. 2.	76
6.20	Závislost účinnosti stínění elektromagnetického pole na frekvenci aproximovaná zobecněnou logaritmickou funkcí spolu s predikcí SE pro $f = 2.5$ GHz. .	78
6.21	Frekvenční závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků (a) skupiny č. 1, (b) vícevrstevných.	82
6.22	Frekvenční závislost SE vzorků (a) skupiny č. 2, (b) skupiny č. 3, (c) skupiny č. 4, (d) skupiny č. 5.	83
6.23	Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na obsahu vodivé komponenty pro (a) veškeré vzorky skupiny č. 1, (b) vzorky skupiny č. 1 s obsahem vodivé komponenty nad perkolačním prahem P_0	84
6.24	Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na obsahu vodivé komponenty pro (a) veškeré vzorky skupiny č. 3, (b) vzorky skupiny č. 3 s obsahem vodivé komponenty nad perkolačním prahem.	84

6.25	Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na obsahu vodivé komponenty pro vzorky skupiny č. 4.	85
6.26	Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na počtu vrstev vzorku T1 pro frekvenci (a) 1.5 GHz, (b) 2.45 GHz.	85
6.27	Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na rozteči hybridní příze tvořící tzv. vodivou mřížku pro frekvenci (a) 1.5 GHz, (b) 2.45 GHz.	86
6.28	Elektromagnetická stínící účinnost vzorků skupiny č. 4 pro frekvenci (a) 1 GHz, (b) 1.5 GHz.	86
6.29	Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením (a) povrchového odporu, (b) objemového odporu s normálním rozdělením.	88
6.30	Závislost (a) povrchové, (b) objemové rezistivity na počtu pracích cyklů pro vzorek T15.	90
6.31	Závislost (a) povrchové, (b) objemové rezistivity na počtu pracích cyklů pro vzorek P15.	90
6.32	(a) Frekvenční závislost SE pro vzorek T15 podrobený různému počtu praní; závislost SE na počtu pracích cyklů vzorku T15 pro frekvenci (b) 1 GHz, (c) 1.5 GHz.	93
6.33	(a) Frekvenční závislost SE pro vzorek P15 podrobený různému počtu praní; závislost SE na počtu pracích cyklů vzorku P15 pro frekvenci (b) 1 GHz, (c) 1.5 GHz.	94
6.34	Mikroskopické snímky tkaniny T15 po a) 0 cyklech, b) 6 cyklech, c) 10 cyklech, d) 20 cyklech praní.	95
6.35	Mikroskopické snímky pleteniny P15 po a) 0 cyklech, b) 8 cyklech, c) 14 cyklech, d) 20 cyklech praní.	95
6.36	Pravděpodobnostní P-P graf pro ověření shody rozdělení výběru dat získaného měřením (a) tepelné vodivosti, (b) výparného odporu.	96
6.37	Závislost (a) tepelné vodivosti λ , (b) tepelné jímavosti b , (c) výparného odporu R_{et} a (d) prodyšnosti A_p na obsahu nerezového ocelového vlákna ve vzorku.	98
6.38	Závislost (a) ohybového momentu M_o - měřeného ve směru osnovy, (b) ohybového momentu M_o - měřeného ve směru útku pro vzorky skupiny č. 1.	99
6.39	Závislost počtu otáček do porušení prvního vazného bodu (odolnost v oděru) pro vzorky skupiny č. 1.	99
6.40	Jednoduché schéma navrženého měřicího zařízení.	103
6.41	Závislost SE na frekvenci měřená přerušeným koaxiálním vedením dle ASTM D4935-99 (spojitá čára), body představují měření SE realizované navrženým vlnovodným přístupem při frekvenci 1.8 GHz.	106
6.42	(a) Porovnání středních hodnot účinnosti elektromagnetického stínění měřených oběma metodami (navržená a porovnávací) spolu s 95% intervaly spolehlivosti, (b) empirický graf Q-Q.	107
6.43	Závislost SE na frekvenci měřená pomocí ASTM D4935-99 na třech různých pracovištích vzorku (a) T5, (b) T20.	111
6.44	Závislost účinnosti elektromagnetického stínění na frekvenci měřená pomocí modifikovaného koaxiálního přerušeného vedení v porovnání s měřením přímo dle ASTM D4935 vzorků (a) T1, (b) T3.	111
6.45	Závislost SE na frekvenci měřená pomocí bezodrazové komory v porovnání s měřením přímo dle ASTM D4935 vzorků (a) T5, (b) T20.	112

6.46	Závislost SE na frekvenci měřená pomocí bezodrazové komory dle EN 50147-1, stíněného prostoru dle EN 61000-5-7, stíněného vlnovodu v porovnání s měřením realizovaným přerušeným koaxiálním vedením dle ASTM D4935-99 pro vzorek P20.	112
6.47	Závislost stínící účinnosti na přirozeném logaritmu objemové rezistivity pro vzorky (a) skupiny 1, (b) skupiny 3.	115
6.48	Frekvenční závislost efektivity stínění elektromagnetického pole skupiny vzorků č. 1 - porovnání predikovaných hodnot s hodnotami experimentálně zjištěnými.	116
6.49	(a) Porovnání stínící efektivity predikované a experimentálně zjištěné, (b) empirický Q-Q graf.	117
6.50	Mikroskopické snímky studovaných textilií skupiny 1: (a) vzorek T5, (b) vzorek T15, (c) vzorek T40, (d) vzorek T75.	118
6.51	Prototyp oděvu tvořený (a) jednoduchou pleteninou, (b) zdvojenou pleteninou v hrudní části, (c) zdvojenou pleteninou v hrudní části vč. vložení tkaniny v oblasti srdce.	119
6.52	Fotografie vytvořených oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu.	120
6.53	Závislost efektivity stínění elektromagnetického pole na frekvenci (a) materiálu A, (b) jednotlivých částí prototypu oděvu tvořeného materiálem B v kombinaci s materiálem C.	121

Seznam tabulek

4.1	Hloubka vniku různých materiálů [44].	21
4.2	Konstanty rovnice (4.43) [44].	24
4.3	Měrná elektrická vodivost materiálu vztažená k měrné elektrické vodivosti mědi (σ_r) a relativní magnetická permeabilita (μ_r) vybraných materiálů [42].	25
4.4	Prahové výkonové hustoty tepelných účinků elektromagnetického pole. . . .	27
4.5	Souhrn doporučených limitů ICNIRP [46].	27
4.6	Klasifikace textilních materiálů dle účinnosti elektromagnetického stínění [53].	32
4.7	Maximální délka otvoru versus frekvence nutná pro dosažení $SE=20$ dB [44].	35
4.8	Hodnoty redukce stínící efektivity v závislosti na počtu otvorů [44].	35
6.1	Vlastnosti vláken použitých pro konstrukci hybridních přízí.	52
6.2	Parametry studovaných délkových útvarů.	53
6.3	Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu při různých upínacích délkách nevodivých přízí a drátu.	56
6.4	Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu antistatických přízí Beltron a Resistat při upínací délce 10 mm.	56
6.5	Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu vlákna polypropylénového a vlákna Bekinox.	57
6.6	Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu při různých upínacích délkách hybridních přízí s jemností 25 tex.	57
6.7	Hodnoty mediánu a intervaly spolehlivosti měření elektrického odporu při různých upínacích délkách přízí hybridních o jemnosti 50 tex.	58
6.8	Hodnoty délkové a specifické rezistivity vzorků přízí.	59
6.9	Hodnoty součinitele specifické rezistivity vzorků hybridních přízí.	61
6.10	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti poměrné pevnosti, tažnosti a počátečního modulu hybridních přízí jemnosti 25 tex.	64
6.11	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti rychlosti šíření zvuku a dynamického modulu hybridních přízí jemnosti 25 tex.	64
6.12	Parametry studovaných textilií.	69
6.13	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity tkaných vzorků skupiny č. 1.	73
6.14	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity tkaných vzorků skupiny č. 2.	73
6.15	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity tkaných vzorků skupiny č. 3.	74
6.16	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity tkaných vzorků skupiny č. 4.	74

6.17	Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 1.	80
6.18	Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE tzv. sendviče tvořeného vrstvami vzorku T1.	80
6.19	Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 2.	80
6.20	Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 3.	81
6.21	Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 4.	81
6.22	Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti predikce SE vzorků skupiny č. 5.	81
6.23	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity vzorku T15.	88
6.24	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti povrchové a objemové rezistivity vzorku P15.	89
6.25	Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty SE vzorku T15.	91
6.26	Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty SE vzorku P15.	91
6.27	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti tepelné vodivosti a jímavosti vzorků skupiny č. 1.	97
6.28	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti výparného odporu a prodyšnosti vzorků skupiny č. 1.	97
6.29	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti ohybového momentu a hodnoty počtu otáček do porušení prvního vazného bodu vzorků skupiny č. 1	97
6.30	Základní vlastnosti studovaných vzorků skupiny č. 1.	104
6.31	Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky, 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty a p-hodnoty F -testu a t -testu komparativního porovnání obou metod.	105
6.32	Základní vlastnosti studovaných vzorků.	109
6.33	Průměrné hodnoty a intervaly spolehlivosti experimentálně naměřené a predikované na základě numerického vztahu (6.22) pro tkané vzorky skupiny č. 1.	116
6.34	Parametry textilií použitých pro tvorbu oděvů.	120
6.35	Pivotové polosumy SE a 95% intervaly spolehlivosti střední hodnoty SE různých částí prototypů oděvů.	121
7.1	Stínící účinnost vodivých plošných materiálů měřená dle ASTM 4935 při frekvenci 1.5 GHz (materiály vyvinuté v rámci disertační práce jsou zvýrazněny tučným písmem).	125

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Název	Jednotka
A	Tažnost	%
AB	Absorpční útlum	dB
AF	Útlum elektrické vodivosti	dB
b_i	Regresní parametry	-
\vec{B}	Magnetická indukce	T
c	Rychlost světla	m.s^{-1}
d	Průměr	m
\vec{D}	Elektrická indukce	C.m^{-2}
$D(x)$	Rozptyl	
E	Youngův modul pružnosti	Pa
E_n	Energie	J
\vec{E}	Intenzita elektrického pole	V.m^{-1}
$E(x)$	Střední hodnota	
f	Poměrná pevnost	cN.tex^{-1}
\vec{F}	Síla	N
f	Frekvence	Hz
h	Tloušťka	m
\vec{H}	Intenzita magnetického pole	A.m^{-1}
I	Elektrický proud	A
I_H, I_D	Horní, dolní mez intervalu spolehlivosti	
\vec{J}	Hustota elektrického proudu	A.m^{-2}
k_0	Vlnové číslo	m^{-1}
K_S	Koeficient stínění	-
L, l	Délka	m
M	Útlum mnohonásobným odrazem	dB
N_o, N_u	Dostava osnovy, útku	m^{-1}
N, n	Počet	-
o	Obvod	m
P	Objemová koncentrace	%
pc	počet cyklů	-
Pd	Výkonová hustota	W.m^{-2}
P_L	Pivotová polosuma	
P_Y	Porozita	-
\vec{P}	Poyntingův vektor	W.m^{-2}
Q, q	Náboj	C
r	Rozteč	m
R	Elektrický odpor	Ω

Symbol	Název	Jednotka
RE	Útlum odrazem	dB
R_F	Mezikvartilové rozpětí	N
R_L	Délková rezistivita	$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$
R_P	Pivotové rozpětí	
R_w	Hmotnostní rezistivita	$\Omega \cdot \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
R_S	Povrchový odpor	Ω
R_V	Vnitřní odpor	Ω
S	Plocha	m^2
SE	Účinnost elektromagnetického stínění	dB
t	Čas	s
T	Jemnost	tex
T_P	Teplota	$^{\circ}\text{C}$
V	Objemový podíl	-
\vec{v}	Rychlost	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Z	Vlnová impedance	Ω
α	Součinitel specifické rezistivity	$\Omega \cdot \text{m}^{-(n+1)}$
α_T	Teplotní součinitel elektrického odporu	K^{-1}
δ	Hloubka vniku	m
ε	Permitivita	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$
ε_0	Permitivita vakua	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$
λ	Vlnová délka	m
μ	Permeabilita	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
μ_C	Zaplnění	-
μ_0	Permeabilita vakua	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
ρ	Rezistivita	$\Omega \cdot \text{m}$
ρ_q	Objemová hustota elektrického náboje	$\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_S	Plošná rezistivita	Ω
ρ_V	Objemová rezistivita	$\Omega \cdot \text{m}$
ρ_w	Hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
σ	Měrná elektrická vodivost	S
φ	Relativní vlhkost vzduchu	%
Φ	Magnetický indukční tok	Wb
Ψ	Elektrický indukční tok	C
ω	Úhlová frekvence	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Zkratka	Název
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
IS	Interval spolehlivosti
CO	Bavlna
PES	Polyester
PP	Polypropylen
R^2	Koeficient determinace
SE	Efektivita elektromagnetického stínění
SS	Nerezová ocel